



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

ANÁLISIS DEL AMORTIGUAMIENTO DE SUELOS COMPACTADOS SOMETIDOS A CARGA CÍCLICA EN EL EQUIPO TRIAXIAL

Trabajo realizado por:

Maialen Navarro López

Dirigido por:

Alberto Ledesma y Antonio Lloret

Máster en:

Ingeniería del Terreno

Barcelona, junio 2019

Departamento de ingeniería civil y ambiental

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mi familia por su apoyo y por ayudarme a sentirme como en casa aun estando lejos de ella, y por impulsarme a luchar para conseguir mis metas.

A mis tutores Alberto Ledesma y Antonio Lloret, por su tiempo, apoyo, comprensión y paciencia conmigo, y por darme todas las herramientas posibles para realizar este trabajo de fin de máster.

A mis compañeros del máster con los cuales he aprendido mucho, y los que me han enseñado mucho de sus diferentes culturas y me han hecho crecer como persona.

A mis amigos hechos en Barcelona por aceptarme y aguantar los momentos de estrés, por las salidas y los viajes que nos ayudaban a desconectar.

A mis amigos del pueblo, los cuales he sentido cerca estando lejos, que me han dado un apoyo y ánimo constante.

A los encargados del Laboratorio de Suelos, sobre todo a Rodrigo Gómez, por ayudarme y enseñarme el funcionamiento de las máquinas a utilizar, y aguantarme en los momentos de estrés.

Resumen

Este trabajo de fin de máster estudia el amortiguamiento en suelos compactados sometidos a carga cíclica mediante el equipo triaxial. Es sabido que este tipo de estudios son importantes en el mundo de la ingeniería geotécnica, ya que con ellos se puede conocer el comportamiento de un suelo a pequeña escala, y así poder evaluar los parámetros que definen al suelo.

Antes de entrar con la metodología de trabajo de esta tesis, se van a mostrar los trabajos anteriores realizados en el ámbito de suelos estudiados con el ensayo triaxial, sobre cargas cíclicas, ejemplos con otros ensayos y temas en común que aporten información para realizar este trabajo.

También se describe cómo trabaja un equipo triaxial, analizando tanto fórmulas y marco teórico como explicando las partes de las que está compuesto.

Una vez presentados los fundamentos teóricos, se describe la metodología de trabajo práctico, para obtener tanto el factor de amortiguamiento como el módulo de corte del suelo, el cual es una arcilla limosa de la ciudad de Barcelona. Se han realizado pruebas de laboratorio con diferentes humedades impuestas, con la intención de obtener distintos grados de saturación. Las muestras han sido utilizadas en cinco ensayos, de los cuales cuatro tienen un grado de saturación en concreto y el quinto ensayo se ha realizado con la muestra completamente saturada. La densidad seca ha sido de 1.63 Mg/m³ (0.00163 g/mm³).

Se ha hecho un análisis de los resultados, y estos se comparan con muestras ensayadas en el equipo de columna resonante. Se han conseguido valores razonables de los resultados para las muestras con el grado de saturación entre 0.2 y 0.8, y la muestra completamente saturada ha dado valores diversos, a causa de la complicación que tiene trabajar con una muestra con esas características.

Se ha demostrado que el módulo de corte de un suelo disminuye a medida que la deformación de corte aumenta, la cual, al ser un ensayo bajo carga cíclica a humedad constante en un equipo triaxial va a variar entre 0.00001 y 0.1. Además, se ha podido concluir que el módulo de corte disminuye a medida que aumenta el grado de saturación, teniendo una anomalía en el caso de la muestra completamente saturada.

Para finalizar, se ha podido demostrar que cuanto menor es el grado de saturación menor es el factor de amortiguamiento, para un menor rango de deformación de corte.

Abstract

This Master Thesis investigates the damping and the shear modulus in compacted soils by means of the triaxial equipment. It is known that this type of work is important in the Geotechnical Engineering, since you can know the behavior of a soil on a small scale, and thus to evaluate the parameters that define the soil.

Before describing the working methodology of this thesis, the previous works carried out in the field of soils tested with triaxial equipment, on cyclic loads and, examples with other tests are presented.

In addition to that, to the text includes a description on how a triaxial test is developed, analyzing the formulas and theoretical framework, and also explaining the parts of the equipment.

Then, the practical aspects of the test methodology are presented, in order to obtain the damping factor and the shear modulus of the soil, which is a silty clay from the city of Barcelona. The laboratory tests have been started with imposed dry densities and with different imposed humidities, with the intention of obtaining different degrees of saturation. Five trials have been carried out, of which four have a specific degree of saturation and the fifth test has been performed with the sample completely saturated. The dry density was 1.63 Mg/m³ (0.00163 g/mm³).

An analysis of the results has been made, and these are compared with samples tested in the resonant column equipment. Reasonable values of the results have been obtained for the samples with the degree of saturation between 0.2 and 0.8, and the fully saturated sample has given different values, because of the difficulties of working with a sample with these characteristics.

It has been shown that the shear modulus of a soil decreases as the shear deformation increases, which, being a test under cyclic load at constant humidity in a triaxial equipment, varies between 0.00001 and 0.1. In addition to that, it has been possible to conclude that the shear module decreases as the degree of saturation increases, having an anomaly in the case of the fully saturated sample.

Finally, it has been shown that the lower the degree of saturation, the lower the damping factor, for a lower range of shear deformation.

Índice

Agradecimientos	2
Resumen.....	3
Abstract	4
Índice de figuras	7
Índice de tablas	12
1. Introducción	13
2. Objetivos	14
3. Antecedentes	15
4. Material utilizado	18
4.1. Introducción	18
4.2. Origen geológico	18
4.3. Clasificación geotécnica	19
4.3.1. Límites de consistencia y carta de plasticidad	19
4.3.2. Distribución granulométrica.....	20
5. Equipo utilizado.....	23
6. Metodología de ensayo.....	26
6.1. Realización de la muestra.....	26
6.2. Ensayo mediante el equipo triaxial	33
6.2.1. Montaje del equipo	33
6.2.2. Realización del ensayo	37
6.2.3. Desmontaje del equipo	39
7. Resultados	41
7.1. Obtención de resultados	41
7.2. Resultados	46
Muestra 1	46
Muestra 2	52
Muestra 3	57
Muestra 4	62
Muestra 5	67
8. Análisis de resultados.....	72
Muestra 1	72
Muestra 2	75
Muestra 3	78
Muestra 4	81
Muestra 5	84

9. Conclusiones..... 87

10. Futuras líneas de investigación 92

11. Bibliografía 93

12. Anexos 94

12.1. Anexo muestra 1 94

12.2. Anexo muestra 2 114

12.3. Anexo muestra 3 132

12.4. Anexo muestra 4 144

12.5. Anexo muestra 5 164

12.6. Anexo todas las muestras 180

Índice de figuras

Figura 1: Mapa geológico de Barcelona (1:250.000). (Instituto Cartográfico de Cataluña, tomado de la tesina de Illa, 2009).....	18
Figura 2: Leyenda del mapa geológico de Barcelona (1:250.000). (Instituto Cartográfico de Cataluña, tomado de la tesina de Illa, 2009).....	19
Figura 3: Características granulométricas del suelo en el gráfico de la carta de plasticidad de Casagrande.....	20
Figura 4: Tamices utilizados y cantidad de suelo acumulado en cada tamiz.....	20
Figura 5: Pesaje de las cantidades de suelo acumuladas.....	21
Figura 6: Curva granulométrica del suelo obtenido con muestras ensayadas anteriormente... ..	21
Figura 7: Curva granulométrica del suelo natural de la ciudad de Barcelona	22
Figura 8: Célula de carga	23
Figura 9: a) Motor con deformación controlada paso a paso b) Célula de carga, GDS	24
Figura 10: a) Inyector de presión de cámara b) Sensor de poros, GDS.....	24
Figura 11: Equipo triaxial y esquema de funcionamiento del equipo triaxial.....	25
Figura 12: Mazo de goma para triturar el suelo.....	26
Figura 13: Suelo triturado pasado por el tamiz nº 10	26
Figura 14: Material triturado y tamizado	27
Figura 15: a) Pesaje del suelo tamizado b) Agregación de agua para llegar a humedad requerida	27
Figura 16: a) Suelo con la cantidad de agua requerida b) Pasaje del suelo húmedo por el tamiz nº10.....	28
Figura 17: Suelo húmedo preparado envuelto en papel film	28
Figura 18: Equipo de compactación de la muestra.....	29
Figura 19: Equipo de compactación pieza por pieza.....	29
Figura 20: Aceitado de las paredes del equipo de compactación.....	30
Figura 21: Equipo de compactación aceitado con la tapa cilíndrica y las pastillas metálicas debajo.....	30
Figura 22: Inserción del suelo húmedo en el equipo de compactación.....	31
Figura 23: Compactación de la muestra.....	31
Figura 24: Aparato cilíndrico utilizado para sacar la muestra compactada	32
Figura 25: a) Deslizamiento del equipo cilíndrico de compactación b) Muestra recién compactada.....	32
Figura 26: Muestra lista para ser ensayada	32
Figura 27: Muestra envuelta en papel film para evitar la pérdida de humedad	33
Figura 28: Colocación de la base del pistón	33
Figura 29: Cortador de tubo, tubo y arandelas que dan estanqueidad	34
Figura 30: Aparato succionador para colocación de membranas.....	34
Figura 31: Succión y colocación de las membranas en la muestra	35
Figura 32: Aparato cilíndrico de dos partes para la colocación de tóricas.....	35
Figura 33: Colocación de tóricas en la muestra, y muestra lista para ensayar en el equipo triaxial.....	36
Figura 34: Llenado de agua de la base del equipo triaxial	36
Figura 35: Colocación de la cámara para iniciar el ensayo del equipo triaxial	37
Figura 36: Ciclos de carga de una etapa del equipo triaxial.....	38
Figura 37: Resultado final de todas las etapas de ciclos del ensayo triaxial	39

Figura 38: Datos obtenidos con el programa GDS	42
Figura 39: Datos calculados para todos los ciclos de todas las etapas mediante los datos de la Figura 38.....	42
Figura 40: Datos calculados para los ciclos específicos seleccionados	42
Figura 41: Figura esquemática para conocer el volumen de las muestras	42
Figura 42: Datos impuestos calculados mediante el "solver" del programa Excel para cada etapa	45
Figura 43: Relación fuerza desviadora-desplazamiento vertical de todas las etapas de una muestra de 5% de humedad	47
Figura 44: Relación fuerza desviadora- desplazamiento vertical de la etapa 9 de una muestra de 5% de humedad.....	48
Figura 45: Relación desviador-deformación de corte de un ciclo de la etapa 9 de una muestra de 5% de humedad.....	48
Figura 46: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de un ciclo de la etapa 9 de una muestra de 5% de humedad	49
Figura 47: Relación de módulo de corte ** y módulo de corte ***- deformación de corte de un ciclo de la etapa 9 de una muestra de 5% de humedad	50
Figura 48: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de un ciclo de una etapa 9 de una muestra de 5% de humedad, y comparación con muestra ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019).....	51
Figura 49: Relación factor de amortiguamiento-deformación de corte de una muestra de 5% de humedad ensayada en triaxial y en columna resonante (Canseco, 2019).....	51
Figura 50:: Relación fuerza desviadora-desplazamiento vertical de todas las etapas de una muestra de 10% de humedad	53
Figura 51: Relación fuerza desviadora- desplazamiento vertical de la etapa 5 de una muestra de 10% de humedad	53
Figura 52: Relación desviador-deformación de corte de un ciclo de la etapa 5 de una muestra de 10% de humedad	54
Figura 53: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de un ciclo de la etapa 5 de una muestra de 10% de humedad	54
Figura 54: Relación de módulo de corte ** y módulo de corte ***- deformación de corte de un ciclo de la etapa 5 de una muestra de 10% de humedad	55
Figura 55: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de un ciclo de una etapa 5 de una muestra de 10% de humedad, y comparación con muestra ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019).....	56
Figura 56: Relación factor de amortiguamiento-deformación de corte de una muestra de 10% de humedad ensayada en triaxial y en columna resonante (Canseco, 2019).....	56
Figura 57: Relación fuerza desviadora-desplazamiento vertical de todas las etapas de una muestra de 15% de humedad	58
Figura 58: Relación fuerza desviadora- desplazamiento vertical de la etapa 5 de una muestra de 15% de humedad	58
Figura 59: Relación desviador-deformación de corte de un ciclo de la etapa 5 de una muestra de 15% de humedad	59
Figura 60: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de un ciclo de la etapa 5 de una muestra de 15% de humedad	59
Figura 61: Relación de módulo de corte ** y módulo de corte ***- deformación de corte de un ciclo de la etapa 5 de una muestra de 15% de humedad	60

Figura 62: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de un ciclo de una etapa 5 de una muestra de 15% de humedad, y comparación con muestra ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019).....	61
Figura 63: Relación factor de amortiguamiento-deformación de corte de una muestra de 15% de humedad ensayada en triaxial y en columna resonante (Canseco, 2019).....	61
Figura 64: Relación fuerza desviadora-desplazamiento vertical de todas las etapas de una muestra de 20% de humedad	63
Figura 65: Relación fuerza desviadora- desplazamiento vertical de la etapa 11 de una muestra de 20% de humedad	63
Figura 66: Relación desviador-deformación de corte de un ciclo de la etapa 11 de una muestra de 20% de humedad	64
Figura 67: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de un ciclo de la etapa 11 de una muestra de 20% de humedad	64
Figura 68: Relación de módulo de corte ** y módulo de corte ***- deformación de corte de un ciclo de la etapa 11 de una muestra de 20% de humedad	65
Figura 69: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de un ciclo de una etapa 11 de una muestra de 20% de humedad, y comparación con muestra ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019).....	66
Figura 70: Relación factor de amortiguamiento-deformación de corte de una muestra de 20% de humedad ensayada en triaxial y en columna resonante (Canseco, 2019).....	66
Figura 71: Relación fuerza desviadora-desplazamiento vertical de todas las etapas de una muestra totalmente saturada	68
Figura 72: Relación fuerza desviadora- desplazamiento vertical de la etapa 12 de una muestra totalmente saturada	68
Figura 73: Relación desviador-deformación de corte de un ciclo de la etapa 12 de una muestra totalmente saturada	69
Figura 74: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de un ciclo de la etapa 12 de una muestra totalmente saturada	69
Figura 75: Relación de módulo de corte ** y módulo de corte ***- deformación de corte de un ciclo de la etapa 12 de una muestra totalmente saturada	70
Figura 76: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de un ciclo de una etapa 12 de una muestra totalmente saturada, y comparación con muestra ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019).....	71
Figura 77: Relación factor de amortiguamiento-deformación de corte de una muestra totalmente saturada ensayada en triaxial y en columna resonante (Canseco, 2019).....	71
Figura 78: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de todas las medidas y ajustes realizados de todas las etapas de una muestra de 5% de humedad.....	72
Figura 79: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de todas las medidas y ajustes realizados de todas las etapas de una muestra de 5% de humedad comparado con una muestra igual ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019)	73
Figura 80: Relación factor de amortiguamiento-deformación de corte de todas las etapas de una muestra de 5% de humedad comparado con una muestra igual ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019).....	74
Figura 81: Relación módulo elástico de corte-acortamiento acumulado para una muestra de 5% de humedad	74
Figura 82: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de todas las medidas y ajustes realizados de todas las etapas de una muestra de 10% de humedad.....	75

Figura 83: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de todas las medidas y ajustes realizados de todas las etapas de una muestra de 10% de humedad comparado con una muestra igual ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019)	76
Figura 84: Relación factor de amortiguamiento-deformación de corte de todas las etapas de una muestra de 10% de humedad comparado con una muestra igual ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019).....	77
Figura 85: Relación módulo elástico de corte-acortamiento acumulado para una muestra de 10% de humedad	77
Figura 86: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de todas las medidas y ajustes realizados de todas las etapas de una muestra de 15% de humedad.....	78
Figura 87: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de todas las medidas y ajustes realizados de todas las etapas de una muestra de 15% de humedad comparado con una muestra igual ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019)	79
Figura 88: Relación factor de amortiguamiento-deformación de corte de todas las etapas de una muestra de 15% de humedad comparado con una muestra igual ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019).....	80
Figura 89: Relación módulo elástico de corte-acortamiento acumulado para una muestra de 15% de humedad	80
Figura 90: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de todas las medidas y ajustes realizados de todas las etapas de una muestra de 20% de humedad.....	81
Figura 91: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de todas las medidas y ajustes realizados de todas las etapas de una muestra de 20% de humedad comparado con una muestra igual ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019)	82
Figura 92: Relación factor de amortiguamiento-deformación de corte de todas las etapas de una muestra de 20% de humedad comparado con una muestra igual ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019).....	83
Figura 93: Relación módulo elástico de corte-acortamiento acumulado para una muestra de 20% de humedad	83
Figura 94: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de todas las medidas y ajustes realizados de todas las etapas de una muestra totalmente saturada.....	84
Figura 95: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de todas las medidas y ajustes realizados de todas las etapas de una muestra totalmente saturada, comparado con una muestra igual ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019)	85
Figura 96: Relación factor de amortiguamiento-deformación de corte de todas las etapas de una muestra totalmente saturada, comparada con una muestra igual ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019).....	86
Figura 97: Relación módulo elástico de corte-deformación acumulada para una muestra totalmente saturada	86
Figura 98: Relación módulo de corte-factor de amortiguamiento de todas las muestras en base a su grado de saturación	87
Figura 99: Relación módulo elástico de corte-grado de saturación, dependiendo de los diferentes niveles de la deformación de corte	88
Figura 100: relación del módulo elástico de corte-grado de saturación para el caso de menor deformación de corte.....	88
Figura 101: Relación factor de amortiguamiento-grado de saturación, dependiendo de las distintas deformaciones de corte	89
Figura 102: Relación factor de amortiguamiento-grado de saturación, para deformaciones de corte más alta y más bajas	90

Figura 103: Relación factor de amortiguamiento-humedad, dependiendo de las distintas deformaciones de corte 90

Índice de tablas

Tabla 1: Muestras ensayadas y sus respectivas humedades teóricas, reales y grados de saturación.....	41
Tabla 2: Tabla de ejemplo de las condiciones iniciales de las muestras.....	41
Tabla 3: Masas de la muestra de 5% de humedad.....	46
Tabla 4: Datos de condiciones iniciales de la muestra de 5% de humedad.....	47
Tabla 5: Masas de la muestra de 10% de humedad.....	52
Tabla 6: Datos de condiciones iniciales de la muestra de 10% de humedad.....	52
Tabla 7: Masas de la muestra de 15% de humedad.....	57
Tabla 8: Datos de condiciones iniciales de la muestra de 15% de humedad.....	57
Tabla 9: Masas de la muestra de 20% de humedad.....	62
Tabla 10: Datos de condiciones iniciales de la muestra de 20% de humedad.....	62
Tabla 11: Masas de la muestra totalmente saturada	67
Tabla 12: Datos de condiciones iniciales de la muestra totalmente saturada.....	67
Tabla 13: Valores de deformación de corte y factor de amortiguamiento de todas las etapas de una muestra de 5% de humedad	73
Tabla 14: Valores de deformación de corte y factor de amortiguamiento de todas las etapas de una muestra de 10% de humedad	76
Tabla 15: Valores de deformación de corte y factor de amortiguamiento de todas las etapas de una muestra de 15% de humedad	79
Tabla 16: Valores de deformación de corte y factor de amortiguamiento de todas las etapas de una muestra de 20% de humedad	82
Tabla 17: Valores de deformación de corte y factor de amortiguamiento de todas las etapas de una muestra totalmente saturada	85
Tabla 18: Valores de deformación de corte y factor de amortiguamiento de todas las etapas de todas las muestras ensayadas en el equipo triaxial	89

1. Introducción

En cualquier obra civil es muy importante conocer cuál va a ser el comportamiento del suelo sobre el que vamos a trabajar, por lo que también lo son el conocer los parámetros que van a definir el comportamiento de dicho suelo, es decir, los ensayos de laboratorio son un punto decisivo de la ingeniería geotécnica.

En este trabajo de fin de máster se van a analizar el factor de amortiguamiento (D) y el módulo de corte (G) de un suelo compactado dependiendo del grado de saturación que tenga. Para conseguir esto, se van a hacer varios ensayos de laboratorio en diferentes probetas con diferentes densidades secas y humedades, aplicando una carga cíclica, sobre las probetas compactadas en el laboratorio. El suelo utilizado ha sido la arcilla limosa de la ciudad de Barcelona.

Para hacer estos ensayos se utilizará el equipo triaxial cíclico

Existen muchos tipos de cargas cíclicas que pueden afectar a un terreno en las obras civiles, como el paso de vehículos en carreteras, movimientos creados por sismos, obras de cimentaciones con maquinarias, el uso de explosivos, etc.

La importancia de este trabajo radica en la necesidad de conocer los parámetros de un suelo compactado y en particular su módulo de corte (G) y su factor de amortiguamiento (D), para poder utilizar los modelos de cálculo necesarios en el diseño en problemas de ingeniería geotécnica, especialmente en problemas de carga cíclica.

Para realizar el trabajo primero se crearán unas probetas, las cuales se van a compactar, y una vez compactadas se va a realizar el ensayo con el equipo triaxial.

Los trabajos de investigación realizados hasta este momento por otros autores, han ensayado valores de saturación de entre 0.2 y 0.8. En este trabajo se va a repetir algunos de estos ensayos y además se intenta hacer el estudio para una muestra totalmente saturada.

2. Objetivos

El presente trabajo de fin de Máster tiene por objetivo incrementar el conocimiento acerca del comportamiento de un suelo compactado estáticamente, mediante el estudio del efecto de la saturación en la rigidez γ , especialmente, en el factor de amortiguamiento.

Para ello es necesario, obtener el módulo de corte G y el factor de amortiguamiento D , en función de la deformación de corte γ , en muestras con diversas humedades usando el equipo triaxial.

Para alcanzar este objetivo general, es necesario atender objetivos más específicos o parciales, que pueden ser resumidos en:

- Aprender y conocer los aparatos y materiales del laboratorio de forma eficaz y adecuada
- Obtener probetas con las características deseadas
- Conocer el funcionamiento del equipo triaxial
- Definir el procedimiento de trabajo con el equipo triaxial
- Lograr ser autosuficiente y poder trabajar en el equipo triaxial sin ayudas externas
- Saber cómo obtener valores medidos en el equipo triaxial
- Definir un método de cálculo para obtener los valores del factor de amortiguamiento (D) y del módulo de corte (G) con la ayuda de los parámetros obtenidos de los ensayos
- Analizar los resultados obtenidos con los ensayos de forma correcta

3. Antecedentes

La Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), y en concreto, el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental lleva mucho tiempo trabajando en el ámbito del comportamiento del suelo, estudiando en particular sus parámetros dinámicos. Se trata de un asunto a conocer a la hora de realizar obras de infraestructura, por lo que, en este apartado se exponen los estudios realizados previamente sobre este aspecto.

En primer lugar, el trabajo escrito por Josep Suriol Castellví (1993) titulado “Medida de la deformabilidad de suelos mediante el equipo de columna resonante”, donde, aunque no utilice el equipo triaxial, resalta que éste solamente obtiene medidas fiables de deformación mayores al 10-1%. Este trabajo enseña que el uso de un modelo no-lineal en el cálculo de deformaciones hace esencial el conocimiento de la curva módulo de corte-deformación, y que en el rango que cubre el aparato de columna resonante se produce la mayor variación de la curva módulo de corte-deformación.

La tesis realizada por Carlos Chávez Negrete (2004) sobre “Estudio del comportamiento triaxial de materiales granulares de tamaño medio con énfasis en la influencia de la succión” es de gran ayuda para la comprensión de la utilización del equipo triaxial. En este trabajo, Chávez estudia el comportamiento hidromecánico que experimenta un suelo compactado, con fábrica abierta, cuando éste se somete a ensayos isótropos, anisótropos y de compresión triaxial drenados con succión constante, así como cuando se le aplican trayectorias de cambios de succión matricial, teniendo en cuenta la historia de tensiones experimentada por el suelo durante la compactación y la succión matricial al final de la compactación. También, quiere obtener pautas de comportamiento útiles para validar hipótesis empleadas en el modelo conceptual constitutivo. El mayor objetivo de su trabajo, al fin y al cabo, es conocer la influencia de la anisotropía sobre el comportamiento mecánico de un suelo compactado estáticamente, a muy baja densidad, y analizar el comportamiento hidromecánico acoplado de este material ante cambios del índice de poros; y, sobre todo, quiere hacer hincapié en el análisis del posible comportamiento anisótropo inducido por la compactación unidireccional en condiciones de deformación lateral nula y la interpretación del cambio de contenido de agua con base a curvas de retención.

Otro trabajo que ha permitido recopilar información ha sido la tesis realizada por Erick José Rodas Aldana (2007) titulada “Caracterización geotécnica de residuos de minas de sal”. En este trabajo Rodas plantea un programa experimental para hacer una caracterización geotécnica de los agregados de sal y de los lodos, y sobre todo determinando sus comportamientos dependiendo de su profundidad. Para ello realiza ensayos con diferentes equipos, para los lodos ensayos triaxiales, de corte directo y edométricos, y para los agregados de sal realiza ensayos triaxiales, de compresión simple y de corte directo. Este trabajo es de ayuda para poder comprender más sobre el uso del equipo triaxial, y porque se pueden ver las diferencias y comparaciones que tiene con distintos tipos de ensayos.

Además, otro trabajo utilizado, aunque en este caso también se centrase en el equipo de columna resonante es la tesis escrita por Jhonny Villavicencio (2008) sobre “Estudio de la deformación angular y volumétrica, así como del módulo de corte de un suelo mediante el equipo de columna resonante”. En este caso lo que realiza es una comparación de diferentes muestras de un terraplén de Rouen (Francia), las cuales en el laboratorio se van a moldear para que tengan diferentes características y unos parámetros deseados. En los ensayos se midió el

cambio de volumen de la muestra, y los cambios en los parámetros como el peso específico, el grado de saturación, la humedad y el módulo de corte G . Gracias a ello se hizo después una comparación de las muestras moldeadas y de las muestras inalteradas obtenidas del terraplén.

Se ha utilizado también la tesina realizada por Claudia García Loncomilla (2011) titulada “Triaxial verdadero con succión controlada: ensayos y modelación” donde se estudia tanto experimental como numéricamente la respuesta de suelos no saturados ensayados mediante un equipo triaxial verdadero con succión controlada. Los ensayos fueron modelados mediante el programa de elementos finitos Code_bright, y realizados mediante el equipo triaxial cúbico desarrollado en la Universidad de Texas at Arlington. Una vez realizada la etapa experimental con el equipo triaxial, realiza la modelación numérica, donde se evaluó la capacidad del modelo numérico para poder predecir las respuestas de una muestra de un suelo bajo diferentes trayectorias de esfuerzos aplicados con succión controlada. Mediante esta investigación se pudo ver que los resultados obtenidos tanto para la etapa experimental como para la numérica tenían una aproximación razonable.

Otra tesina considerada es la de Persia Melissa Castillo Aristy (2014) sobre “estudio de la frecuencia en la deformación en condiciones edométricas de un suelo compactado sometido a carga cíclica”. El objetivo de la tesina es calificar la conducta de deformación de la arcilla roja del Campus Nord sometido a carga cíclica, a partir de la variable de frecuencia de aplicación de la carga. Esto lo realiza mediante un aparato desarrollado en el Departamento de Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Cataluña, el cual tiene un sistema mecánico de aplicación de carga a frecuencias desde 0.5 Hz hasta 25 Hz (en el caso de este trabajo, estas frecuencias fueron de 2 Hz, 4 Hz, 8 Hz y 16 Hz). Concluye la tesina diciendo que se puede apreciar una cierta tendencia al aumento del valor de las deformaciones en las probetas a la vez que aumentaba el valor de la frecuencia.

También hay que mencionar el trabajo de He Lu (2016) sobre “double hardening soil model for soil behavior. Formulation, implementation and application”. El objetivo de esta tesis es la aplicación y validación de un Modelo de suelo de doble endurecimiento (DHSM). En este modelo, dos mecanismos de endurecimiento son comparados, llamados endurecimiento volumétrico de un modelo de estado crítico unificado para arcillas y arenas (CASM) de Yu (1988) y endurecimiento por cizallamiento del modelo de suelo de endurecimiento (HSM). Se discuten las ecuaciones básicas y los parámetros correspondientes. Se introducen algunas mejoras y modificaciones de DHSM y se implementa el modelo constitutivo en el código de elementos finitos Plaxis. el programa DHSM identifica y aplica las pruebas de drenaje que incluyen diferentes tasas de consolidación y condiciones isotrópicas-anisotrópicas en la arcilla de baja plasticidad. Se examinan y estudian diversos tipos de comportamientos de geomateriales complejos en función de los resultados de laboratorio y de simulación numérica. A través de los resultados, el modelo se corresponde bien con la prueba de drenaje a través de parámetros reales, especialmente durante condiciones de sobreconsolidación.

Finalmente, otro de los trabajos que he utilizado es el realizado por Jorge Poucell Mier y Terán (2016) que trata de “Amortiguamiento en suelos compactados”, el cual estudia el efecto del grado de saturación en el factor de amortiguamiento de los suelos compactados mediante pruebas de laboratorio en probetas con dos densidades secas impuestas, utilizando el método de compactación estática, en la arcilla limosa del Llano de Barcelona. Hizo un análisis del suelo mediante el equipo de columna resonante, y analizando los resultados de los ensayos y los parámetros obtenidos, se demostró que la rigidez del suelo aumenta a medida que aumenta la densidad seca, y que, por lo contrario, el factor de amortiguamiento disminuye con el aumento

de la densidad seca. También se demostró que a medida que el grado de saturación del suelo aumenta, el módulo de corte disminuye y el factor de amortiguamiento también aumenta.

Por último, el libro de “Principles of soil dynamics” de Braja M. Das y G. V. Ramana (2010) ha sido de gran ayuda para poder entender la teoría de la dinámica de suelos y el comportamiento de los diferentes tipos de equipos que se encuentran en el laboratorio, ayudándose además de ejemplos y ensayos reales realizados.

4. Material utilizado

4.1. Introducción

Para realizar este trabajo lo primero que hay que hacer es realizar las probetas. Este capítulo va a describir el suelo utilizado para la realización de estas probetas, el cual es una arcilla limosa de la ciudad de Barcelona. Para caracterizar este suelo se han tomado en cuenta varios estudios, sobre todo el estudio realizado por Suriol et al. (2014).

El suelo es tamizado mecánicamente, y el material con el que se ha trabajado es el que ha pasado por el tamiz nº10 de la ASTM, con una abertura de 2 mm.

4.2. Origen geológico

Las principales formaciones geológicas que se presentan en Barcelona son el paleozoico, el terciario y el cuaternario. El paleozoico está compuesto por granitos, aunque, además, también incluye cuarcitas, pizarras y calizas. El terciario, puede dividirse en mioceno y plioceno, donde este primero está compuesto por calizas, areniscas y margas, y el segundo está constituido por margas fosilíferas azules con niveles intercalados de arena. El periodo de cuaternario está formado por una superficie levemente inclinada desde las sierras hasta el mar. En las zonas más bajas hay depósitos de materiales más recientes, de origen aluvial y deltaico, de los ríos Besós y Llobregat (Illa,2009), como puede verse en las siguientes Figura 1 y Figura 2.

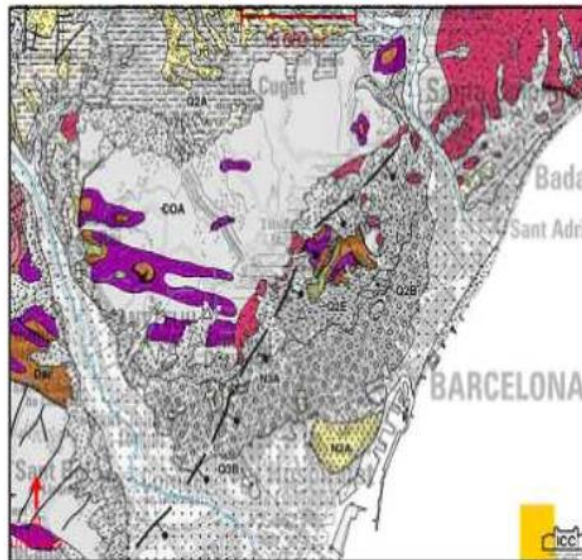


Figura 1: Mapa geológico de Barcelona (1:250.000). (Institut Cartogràfic de Catalunya, tomado de la tesina de Illa, 2009)

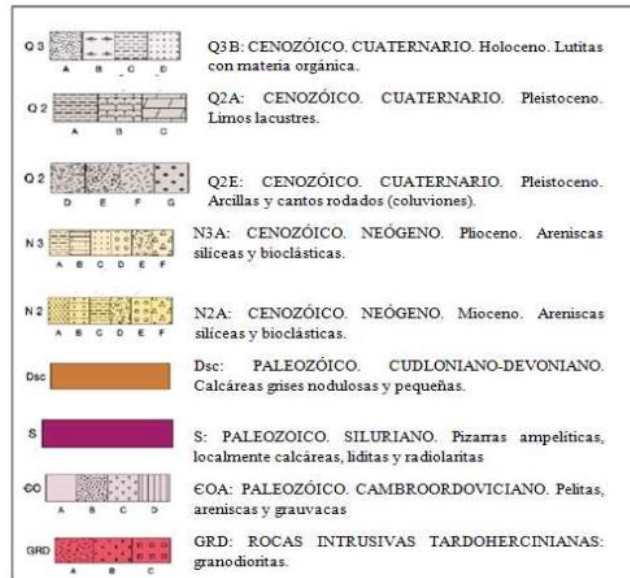


Figura 2: Leyenda del mapa geológico de Barcelona (1:250.000). (Instituto Cartográfico de Cataluña, tomado de la tesina de Illa, 2009)

4.3. Clasificación geotécnica

4.3.1. Límites de consistencia y carta de plasticidad

A la hora de identificar y clasificar un suelo, los límites de Atterberg son un método muy útil.

Las propiedades del suelo a utilizar se han obtenido de unos ensayos realizados por Suriol et al (2014), donde para realizar la probeta, se va a utilizar una cantidad de suelo de la arcilla limosa de la ciudad de Barcelona, la cual está constituida por 30% de arena, 46% de limo y 24% de arcilla.

Su límite líquido es de 31% y su límite plástico es de 19%. La densidad de las partículas sólidas es de 2.69 Mg/m³.

Basándose en sus características granulométricas, esta arcilla limosa del suelo de Barcelona es un suelo de grano fino, y teniendo en cuenta lo establecido en el gráfico de la carta de plasticidad de Casagrande, recibe la nomenclatura de CL, la cual significa que es una arcilla de baja plasticidad, como puede apreciarse en la siguiente Figura 3.

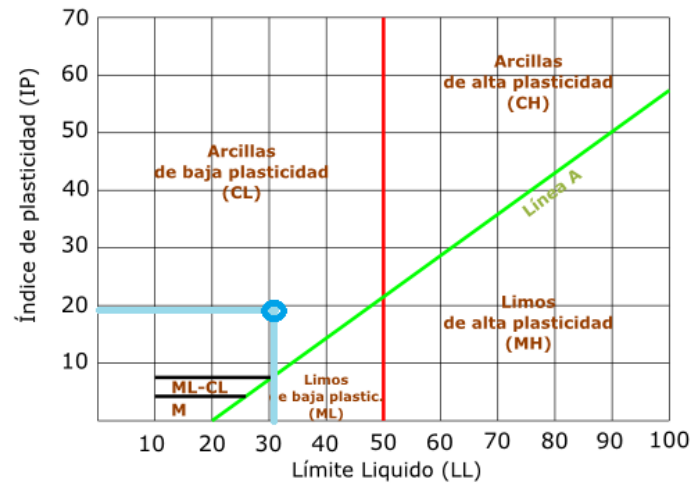


Figura 3: Características granulométricas del suelo en el gráfico de la carta de plasticidad de Casagrande

4.3.2. Distribución granulométrica

Se ha realizado un estudio granulométrico tanto con el suelo obtenido, como con unas muestras ya utilizadas anteriormente, para comprobar si se trata del mismo suelo y poder trabajar con ambos suelos.

En la siguiente Figura 4 puede verse la distribución de cantidad de suelo que ha quedado dependiendo del tamiz por el que ha pasado, el que después se va a utilizar para realizar la curva granulométrica.



Figura 4: Tamices utilizados y cantidad de suelo acumulado en cada tamiz

Para poder realizar la curva granulométrica, se han pesado todas las cantidades de suelo que se han quedado en cada tamiz, para después, ya sabiendo el peso total del suelo utilizado, obtener la cantidad de material que ha pasado y así obtener la curva granulométrica. En la Figura 5 se puede ver un ejemplo de cómo se han pesado las cantidades de suelos acumulados en cada tamiz.



Figura 5: Pesaje de las cantidades de suelo acumuladas

En el laboratorio se disponía de varias muestras de suelo y se deseaba comprobar que al menos dos de ellas correspondían al mismo suelo del llano de Barcelona. A continuación, en la Figura 6 y Figura 7, puede verse la curva granulométrica obtenida de la granulometría realizada al suelo de la arcilla limosa de la ciudad de Barcelona que había sido utilizado anteriormente. Como puede apreciarse en la granulometría de ambos casos del suelo, más de la mitad del material pasa por el tamiz nº 200, por lo que se puede decir que es un suelo de grano fino.

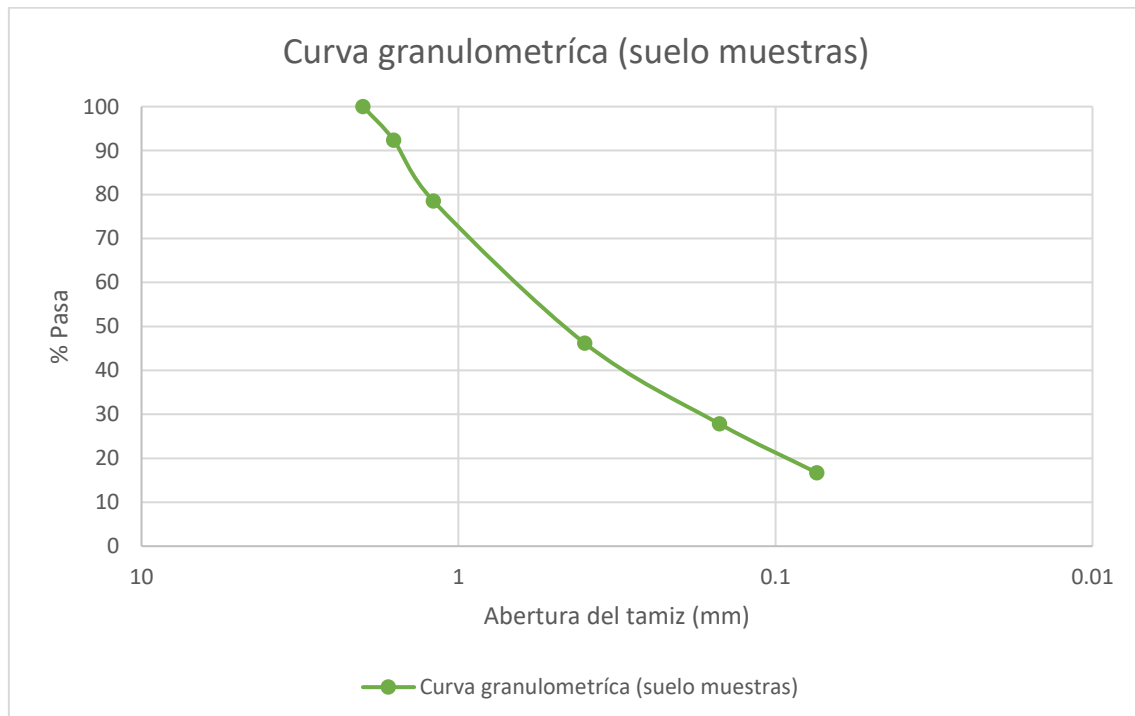


Figura 6: Curva granulométrica del suelo obtenido con muestras ensayadas anteriormente

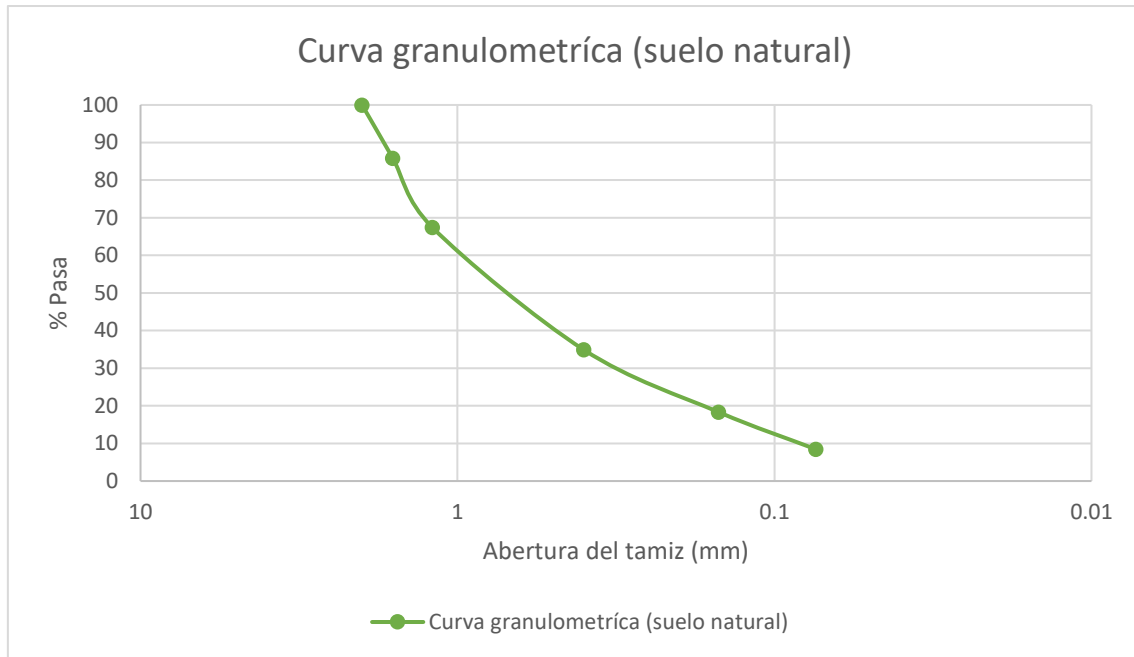


Figura 7: Curva granulométrica del suelo natural de la ciudad de Barcelona

Viendo ambos gráficos, se puede deducir que se trata del mismo tipo de suelo, por lo que pueden utilizarse ambos suelos como uno para realizar los ensayos.

5. Equipo utilizado

En este capítulo se va a explicar de qué partes está formado el equipo triaxial y cómo funcionan. Estos datos se han obtenido de la clase práctica de “Mecánica de suelos” del primer año del máster en ingeniería del terreno (Lloret, 2017).

Para realizar el ensayo en el laboratorio hay un equipo triaxial GDS fabricado por la empresa GDS Instruments Ltd. El diseño del equipo está inspirado en el clásico triaxial tipo “stress path” de Bishop y Wesley, con las siguientes características:

- La deformación y fuerza axial se imponen mediante un pistón controlado por un motor “paso a paso”

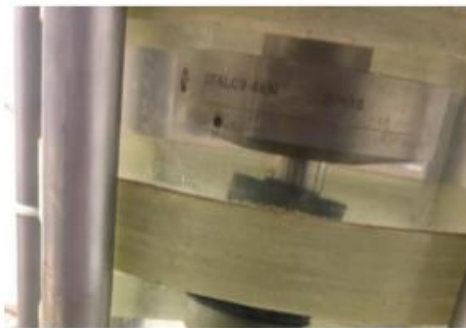


Figura 8: Célula de carga

- La medida de la deformación axial se realiza mediante el conteo de pasos (impulsos) sucesivos del motor aplicados al desplazamiento del pistón. La resolución de la medida almacenada en el archivo de resultados es de $1\mu\text{m}$. (ver figura 9a,10,11)
- La medida de la fuerza axial se hace mediante una célula de carga de 4 kN de capacidad y 0.005 kN de precisión, sumergible y situada en el interior de la cámara. (figura 9b)
- La presión de cámara y la de cola están impuestas por la inyección de agua que aplican sendos pistones desplazados por motores “paso a paso” como se puede ver en la Figura 10, y controlados desde un ordenador. El equipo permite un control de la presión en el rango de 0 a 2 MPa y un control del volumen de agua de hasta $0.5\text{ mm}^3/\text{paso}$.



Figura 9: a) Motor con deformación controlada paso a paso b) Célula de carga, GDS

- Tanto la presión de cola como la de cámara se miden con transductores incorporados en cada unidad de inyección (la resolución es de 0.1 kPa en el archivo de datos).
- La medida de la presión intersticial (de poros) se realiza con un transductor eléctrico el cual se puede ver en la Figura 10b, que opera en el rango de 0 a 2 MPa (resolución de 0.1 kPa en el archivo de resultados) situado en contacto con el borde de la probeta opuesto al que se impone la presión de cola.



Figura 10: a) Inyector de presión de cámara b) Sensor de poros, GDS

- Todos los transductores de presión y desplazamiento, así como los pistones que suministran la presión, están conectados a un sistema de adquisición de datos que permite controlar las diferentes etapas del ensayo mediante un ordenador; también se pueden programar múltiples trayectorias tensionales y almacenar en tiempo real las diferentes variables medidas durante el ensayo en vistas a un posterior procesamiento de datos.

A continuación, se muestra una imagen de un equipo triaxial completo y un esquema de un equipo triaxial, Figura 11.

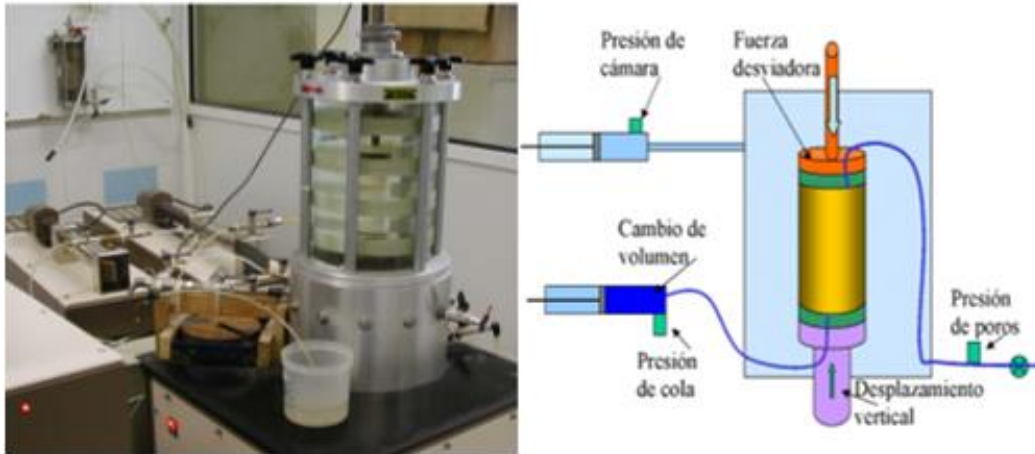


Figura 11: Equipo triaxial y esquema de funcionamiento del equipo triaxial

6. Metodología de ensayo

En este capítulo se va a explicar el proceso llevado a cabo en el laboratorio para obtener los resultados requeridos, donde primero se va a explicar cómo se ha realizado la muestra a ensayar. Después, se va a explicar cómo se ha realizado el ensayo mediante el equipo triaxial, tanto el montaje de la muestra en el equipo, como el mismo ensayo, y el desmontaje del equipo.

6.1. Realización de la muestra

Lo primero que se ha hecho ha sido separar el material seco requerido, para un número de probetas predeterminado para así poder trabajar el mismo tipo de muestra tanto con el equipo triaxial como con la columna resonante. Los ensayos en columna resonante son objeto de otra Tesis de Máster (Canseco, 2019) que investiga también las propiedades del mismo suelo con otro equipo. De esta manera se podrá hacer después una comparación. Una vez se tiene la cantidad de material seco, se ha triturado mediante un mazo de goma, y después se ha pasado por el tamiz número 10, el cual tiene la abertura de 2mm, como se puede apreciar en la Figura 12, Figura 13 y Figura 14.



Figura 12: Mazo de goma para triturar el suelo



Figura 13: Suelo triturado pasado por el tamiz nº 10



Figura 14: Material triturado y tamizado

Una vez se tiene el material seco tamizado, hay que realizar las muestras, las cuales, sabiendo que se quieren lograr unas muestras de 78 mm de altura y 36 mm de diámetro, y una densidad seca de $1,63 \text{ mg/m}^3$, hay que seleccionar la cantidad de suelo seco necesario para llegar a esas condiciones.

Cuando ya se tiene la cantidad de material seco requerido, se añade agua hasta que el suelo tenga la humedad que se quiera lograr, que va a variar entre 5 y 20%. Como se puede ver en las Figuras 15a, 15b, 16a, 16b, donde se observa que primero se pesa la cantidad de suelo seco requerido, después puede verse cómo se le va añadiendo agua necesaria para obtener la humedad requerida y así el grado de saturación que se quiere obtener. Una vez se ha añadido toda el agua, se pasa todo el suelo húmedo por el tamiz 10 de 2 mm de apertura, después se vuelve a pesar, para comprobar si se ha perdido algo de humedad en este segundo proceso de tamizado. En el caso de que se haya perdido humedad, se vuelve a añadir la cantidad de agua necesaria, se vuelve mezclar bien para así al final obtener un suelo con la humedad homogéneamente expandida.



Figura 15: a) Pesaje del suelo tamizado b) Agregación de agua para llegar a humedad requerida



Figura 16: a) Suelo con la cantidad de agua requerida b) Pasaje del suelo húmedo por el tamiz nº10

Una vez la humedad está homogénea por todo el suelo, éste se envuelve con papel film y deja reposando durante 24 horas, para homogeneizar el contenido de agua, pero sin que pierda humedad. Esto puede verse en la Figura 17.



Figura 17: Suelo húmedo preparado envuelto en papel film

Cuando el material está preparado, hay que realizar la compactación de éste, para así ya tener la muestra en la forma correcta y poder ensayarla. Para ello hay que utilizar un equipo como el que se ve en la Figura 18, y en la Figura 19 pueden verse todas las piezas utilizadas durante esta compactación.



Figura 18: Equipo de compactación de la muestra



Figura 19: Equipo de compactación pieza por pieza

En la Figura 19 puede verse el equipo de compactación al completo, el cual se compone de:

- 1: Aparato cilíndrico que sirve para obtener la muestra de forma correcta introduciéndolo por el centro del equipo de compactación, sacando así la muestra compactada perfectamente y sin romperla.
- 2: Tapa cilíndrica que se introduce por la parte de arriba del hueco del cilindro, la cual realiza la compactación desde la parte de la muestra.
- 3: Base del equipo compactador, donde se colocan tres piezas como las que pueden verse en la FIGURA 21 para así poder compactar también la muestra por debajo.
- 4: Aceite y pincel que se utilizan para que el suelo de la muestra no se quede pegado a las paredes del equipo.
- 5: Tres paredes que completan el cuerpo cilíndrico del aparato compactador, donde se introduce el suelo y se compacta la muestra
- 6: Tornillos necesarios para cerrar las paredes y poder ajustarlas para que el terreno no salga de dentro y puedan entrar tanto la tapa cilíndrica como el aparato cilíndrico que sirve para sacar la muestra.

7: Llaves que se utilizan para poder atornillar y desatornillar los tornillos mencionados anteriormente.

Primero, hay que desmontar el molde y se le pone aceite para que el suelo no llegue a pegarse a él y se rompa al intentar sacar la muestra, como puede verse en la Figura 20. Después de aceitarlo, hay que volver a montar el molde, pero sin apretar muy fuerte los tornillos, para así después poder bajar fácilmente la tapa cilíndrica que compacte la muestra, la cual se ve en la Figura 21.

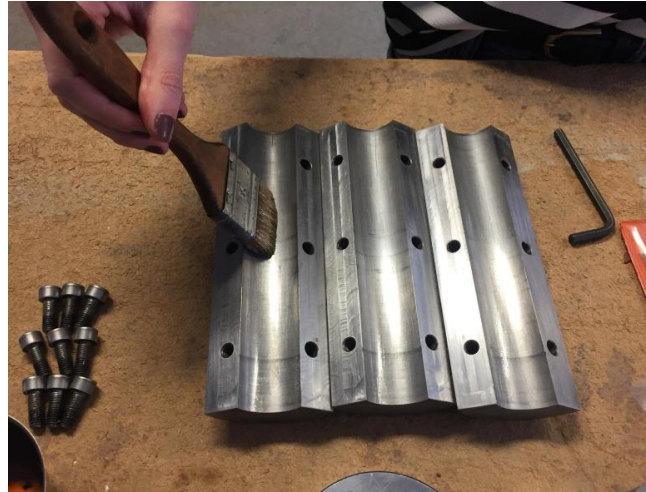


Figura 20: Aceitado de las paredes del equipo de compactación



Figura 21: Equipo de compactación aceitado con la tapa cilíndrica y las pastillas metálicas debajo

Decir que las pastillas metálicas que están abajo hay que colocarlas sobre la base del aparato compactador, para así no compactar la muestra solamente por arriba, sino que, también se compacte desde abajo, una vez se quitan las pastillas metálicas mencionadas.

Una vez hecho esto, hay que introducir el suelo húmedo preparado anteriormente, como se puede ver en la Figura 22.



Figura 22: Inserción del suelo húmedo en el equipo de compactación

Cuando todo el material está dentro del molde, hay que introducir el cilindro para compactar la probeta, como se ve en la Figura 23. Además, se quitan las pastillas metálicas de debajo para que compacte tanto desde arriba como desde abajo, como ya se ha especificado anteriormente.



Figura 23: Compactación de la muestra

Y una vez compactada, hay que utilizar el aparato cilíndrico que se aprecia en la Figura 24 para poder sacarlo con mayor facilidad y no romper la muestra desmontando el molde. Hay que realizarlo quitando la tapa cilíndrica metálica que compacta desde arriba, entonces hay que introducir el aparato por la parte de arriba, después, hay que girar por completo todo el aparato de compactación, y arrastrarlo hacia abajo con cuidado para que las paredes del aparato compactador se resbalen hacia abajo y así la muestra compactada se quede en la punta del aparato cilíndrico y quede a la vista, para poder cogerla, como puede verse en las Figura 25a y Figura 25b.



Figura 24: Aparato cilíndrico utilizado para sacar la muestra compactada



Figura 25: a) Deslizamiento del equipo cilíndrico de compactación b) Muestra recién compactada

Después, como puede verse en la Figura 26, se obtiene la muestra que va a estar lista para poder ser utilizada en un ensayo en el equipo triaxial.



Figura 26: Muestra lista para ser ensayada

Para finalizar, hay que envolver las muestras en papel film para que no pierdan su humedad hasta el momento de realización del ensayo, como puede verse en la Figura 27.



Figura 27: Muestra envuelta en papel film para evitar la pérdida de humedad

6.2. Ensayo mediante el equipo triaxial

Para entender estos apartados que vienen a continuación, y entender cómo se monta el equipo, se coloca la muestra y se desmonta el equipo, hay que tener en cuenta el capítulo 5 de este trabajo, donde se explica cómo funciona el equipo triaxial y cuáles son sus diferentes partes.

6.2.1. Montaje del equipo

Para montar el equipo y colocar la muestra a ensayar, lo primero que hay que hacer es cambiar la base del pistón, poniendo una base para un tamaño de probeta igual al que se va a ensayar, como se puede ver en la Figura 28.



Figura 28: Colocación de la base del pistón

En primer lugar, hay que encender el aparato GDS, el cual es el que aplica la presión de cámara y de cola, y también hay que encender el ordenador y abrir el programa GDSLab. Este programa se utiliza para subir la base del equipo, para que sea más fácil la colocación de la muestra.

Como se aprecia en la Figura 29, hay que cortar los tubos mediante un cortador, y colocarlos en la base para que quede hermético. Una vez hecho esto, tanto el cono como la arandela que se

ven en la Figura 29, tienen que ser apretados al tubo para conseguir estanqueidad, es decir, para conseguir que ni entre ni salga agua.



Figura 29: Cortador de tubo, tubo y arandelas que dan estanqueidad

Para colocar la muestra a ensayar, primero hay que colocar una piedra porosa y a continuación se le tiene que poner encima la muestra. Utilizando el equipo que muestra la Figura 30, se le ponen dos membranas a la muestra. Estas membranas hay que colocarlas en el aparato mencionado, succionando por el tubo de este aparato, así las membranas se pegan por el vacío a sus paredes y se consigue que se coloquen sobre la muestra fácilmente, como puede verse en la Figura 31. Una vez el aparato está a la altura de la muestra, hay que dejar de aplicar vacío, y la membrana se queda perfectamente adherida a la muestra. Es preferible ponerles dos membranas a las muestras por prevenir posibles fallos de una de las membranas y para evitar problemas de comunicación de la presión de cola con la de cámara.



Figura 30: Aparato succionador para colocación de membranas



Figura 31: Succión y colocación de las membranas en la muestra

Una vez las membranas estén colocadas, hay que ponerles cuatro tóricas a la muestra, dos irán en la zona del cabezal, y las otras dos en la parte de la base. Para ello es más fácil utilizar un aparato metálico de dos piezas el cual ayuda a colocar las tóricas, como puede verse en la Figura 32.



Figura 32: Aparato cilíndrico de dos partes para la colocación de tóricas

Primero hay que introducir el aparato metálico con las cuatro tóricas y tienen que colocar las dos tóricas de la base. Una vez hecho esto, se coloca el cabezal dentro de la membrana sobre la muestra, y después se tienen que colocar las dos tóricas que van sobre él, y la muestra queda como puede verse en la Figura 33.



Figura 33: Colocación de tóricas en la muestra, y muestra lista para ensayar en el equipo triaxial

Después de que la muestra esté colocada, mediante el equipo de ordenador GDSLab hay que bajar la base al máximo, y en el apartado de “axial displacement” hay que seleccionar “set zero”, para que tome ese punto como punto de partida a la hora de medir los desplazamientos verticales.

Para finalizar la fase de montaje, una vez colocada la muestra sobre la base, hay que llenar el hueco de la base de agua destilada, como puede verse en la Figura 34, y por último hay que colocar la cámara como se ve en la Figura 35, teniendo cuidado de que éste no toque la parte de arriba de la muestra, ya que eso podría dañar la muestra y haría que los resultados salieran alterados.

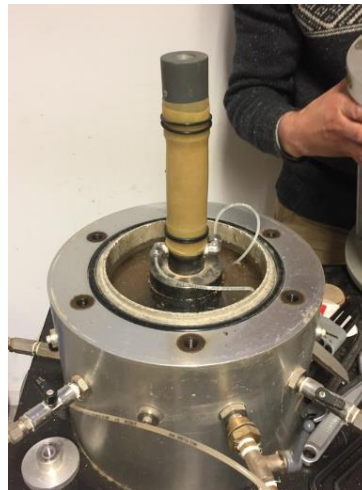


Figura 34: Llenado de agua de la base del equipo triaxial



Figura 35: Colocación de la cámara para iniciar el ensayo del equipo triaxial

Una vez la cámara está colocada, hay que abrir su llave de abajo para poder llenar la cámara de agua para poder empezar con el ensayo.

En caso de un ensayo para muestras saturadas:

En caso de que las muestras a ensayar sean unas muestras saturadas, primero hay que saturar los tubos que van desde los pistones (presión de cola) hasta la base. Para ello, primero hay que llenar los pistones. Una vez estén los pistones llenos, hay que tener en cuenta que éstos están llenos de agua con aire. Como lo que queremos es que los pistones estén llenos de agua sin aire, se van a cerrar las llaves del pistón, se le tiene que aplicar una presión, y hay que volver a abrir la llave para que salga todo el aire.

Una vez esté el pistón saturado, lo que se quiere hacer es saturar el cabezal, por lo que se tiene que abrir la llave, y después de eso, y mediante el programa de ordenador GDS, hay que pulsar en el comando "empty". Una vez se vea que no sale más aire se cierra la llave, y se deja la muestra saturada durante 24 horas para poder empezar con el ensayo.

6.2.2. Realización del ensayo

Como el ensayo es a humedad constante, las llaves que conectan a los tubos de la base tienen que estar cerradas, y en cambio la llave de salida tiene que estar abierta, teniendo en cuenta que el tubo tiene que tocar el agua para que la muestra no pierda humedad.

Para empezar con la realización del ensayo hay que tener en cuenta que puede hacerse igual que durante el montaje con el desplazamiento axial, es decir, pueden ponerse las presiones en cero, pero hay que tener en cuenta que ésta tiene que estar en presión atmosférica. Puede conseguirse abriendo la llave que conecta el pistón y la cámara del equipo triaxial, y también puede hacerse mediante el programa de ordenador GDSLab con el comando: reset+enter→pressure zero.

Una vez hecho esto, hay que dejar las llaves de cola cerradas, y se tienen que abrir las llaves que van a la cámara, las cuales van a dar la presión de confinamiento.

Entonces, después de eso, ya hay que empezar a introducir diferentes etapas de carga en el programa de ordenador. Hay que tener en cuenta que la primera etapa va a ser para aplicar el confinamiento, en la cual metemos un $q_2=5$ kPa, un $p_2=200$ kPa y se le van a dar 5 minutos de tiempo para que haga ese trabajo. Se va a definir que la deformación axial máxima sea del 10%, que mantenga las presiones al final de cada etapa mediante el comando "Hold pressures at end of test" y que al final de cada etapa no cambie automáticamente, sino que espere a la interacción del usuario mediante el comando "wait for user interaction".

Cuando ya está hecha esta primera etapa, hay que ir a ver la lista de los resultados y hay que seleccionar qué información y qué resultados quieren verse en los gráficos. En este caso, los gráficos de interés serían:

-Gráfico 1: Time, Radial Stress

-Gráfico 2: Cambridge p' , Desviator(stress q)

-Gráfico 3: Axial displacement, axial load

Después hay que realizar más etapas de forma cíclica dinámica, aplicando una frecuencia determinada, de 0,1Hz en este caso, un desplazamiento axial que va a depender del desplazamiento axial que se tenga en la etapa anterior, donde el valor que se va a imponer va a ser siempre un valor mayor al de la etapa anterior, y una amplitud que va a variar y a depender del gráfico de carga que se obtenga en la etapa anterior. La presión de celda se ha mantenido en 200 kPa, con un total de 5 ciclos donde se van a estudiar 64 puntos por cada ciclo.

Se ha considerado realizar diferentes etapas en las que la frecuencia siempre sea igual (0,1 Hz), el desplazamiento axial va a ir aumentando en cada etapa, y la amplitud va a variar dependiendo de los resultados vistos en el gráfico 3, es decir dependiendo del desplazamiento vertical, viendo si hay que aplicar un valor mayor o menor. En cada etapa se van a crear diferentes ciclos, como puede apreciarse en la Figura 36, la cual es un ejemplo de los ciclos que van a quedar en todas las etapas de carga realizadas durante todos los ensayos.

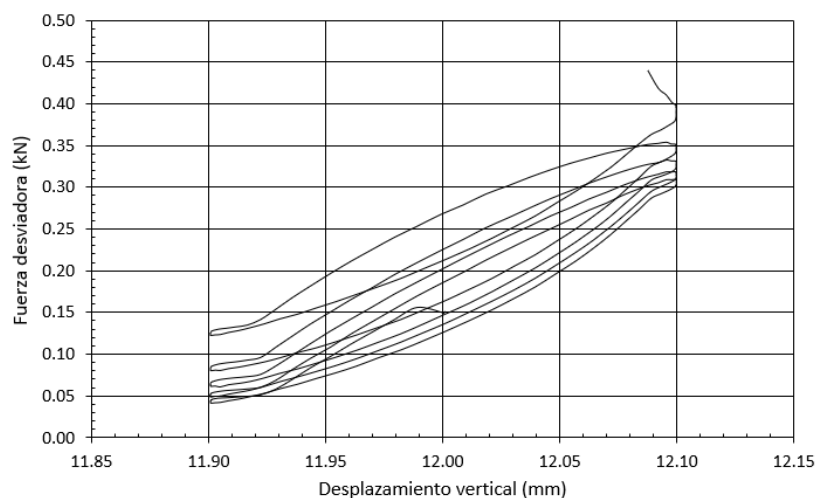


Figura 36: Ciclos de carga de una etapa del equipo triaxial

Al realizar esto, se va a obtener un gráfico que relaciona desplazamiento vertical (mm) y fuerza desviadora (kN) como el de la Figura 37, el cual es un ejemplo de los tipos de gráficos que hay que obtener en cada uno de los ensayos.

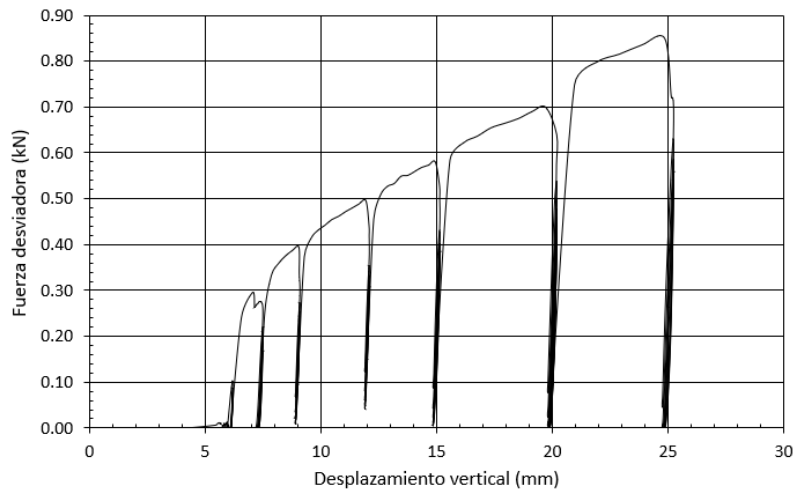


Figura 37: Resultado final de todas las etapas de ciclos del ensayo triaxial

Estas diferentes etapas van a ir realizándose hasta el momento que la muestra rompa, que es el punto donde la carga vertical ya no aumenta por mucho que se hagan nuevas etapas y se cambien los valores de desplazamiento vertical y amplitud impuestos. Si la muestra no llega al punto de romper, habrá que realizar una cantidad grande de etapas que nos den seguridad de que los datos obtenidos van a ser fiables.

Para finalizar el ensayo, los datos necesarios se recogen en el programa de ordenador GDSLab y éstos se pasan a un documento de Excel para analizar los resultados.

6.2.3. Desmontaje del equipo

A la hora de desmontar el equipo, hay que tener en cuenta que aún hay presión dentro de la cámara, por lo que, cuando se quiera quitar el agua de dentro, primero hay que disminuir la presión interior.

Una vez no hay presión dentro de la cámara, hay que abrir la llave que comunica la cámara con el contenedor de agua, se tiene que abrir el tornillo de arriba de la cámara, y aplicar aire a presión, para así conseguir vaciar éste.

Es importante, que una vez que se ha vaciado el agua, se vuelva a cerrar la llave que comunica la cámara y el contenedor de agua.

Cuando la cámara esté vacía, se retira la cámara con cuidado, soltando los tornillos y las varillas que tiene. Para terminar, se retira el cabezal, y quitando las tóricas y las membranas hay que colocar la muestra en una bandeja para poder pesarla y conocer así el peso final de la muestra

una vez ensayada. Una vez hecho esto, hay que meter la muestra en el horno para conocer la humedad final con la que ha terminado la muestra durante el ensayo.

7. Resultados

En este apartado se van a mostrar los resultados obtenidos en los ensayos realizados mediante el equipo triaxial. En primer lugar, se va a mostrar cómo se han obtenido estos resultados, explicando los datos medidos mediante el ensayo y los datos calculados mediante modelos matemáticos. Se van a representar los resultados obtenidos en una etapa de cada ensayo realizado con cada muestra, las cuales tienen las características de la Tabla 1.

Muestra	1	2	3	4	5
Humedad teórica (%)	5	10	15	20	25
Humedad real (%)	5.17	10.25	14.81	19.95	24.93
Grado de saturación (%)	20.69	40.95	59	80.16	99.49

Tabla 1: Muestras ensayadas y sus respectivas humedades teóricas, reales y grados de saturación

Después se van a mostrar los resultados de una de las etapas de cada uno de los cinco ensayos realizados, y el resto de resultados de todas las etapas se incluyen en el Anexo de este documento.

7.1. Obtención de resultados

Los resultados se han obtenido pasando los datos recolectados mediante el programa GDSLab a una hoja de Excel, todo esto con el objetivo de obtener tanto el factor de amortiguamiento de cada muestra como el cambio del módulo de corte sobre la deformación de corte. Los datos que no se han obtenido del Excel son los datos referentes a las dimensiones y peso de la muestra, los cuales se han conseguido midiéndolos con reglas y pesándolos con la báscula.

Todos estos datos de las muestras se calculan y se definen en una tabla en el Excel como la de la Tabla 2, la cual se ha realizado para todas las muestras en cada uno de los ensayos.

DATOS DE LA MUESTRA	
Condiciones Iniciales	
Ho (mm)	76
Vo (mm ³)	86192.74
Area Inicial (mm ²)	1134.11
Peso de Suelo (gr)	159.97
Gs (gr/cm ³)	2.72
dens nat (gr/cm ³)	1.86
W nat %	14.81
Vs (mm ³)	51227.94
Vv (mm ³)	34964.79
Indice de Vacios	0.68
Vw (mm ³)	20630
Sr (%)	59.00

Tabla 2: Tabla de ejemplo de las condiciones iniciales de las muestras

En esta hoja de Excel se ha creado una tabla, con los datos conseguidos como con los datos que se querían calcular, como puede verse en la Figura 38, Figura 39 y Figura 40.

Job Location:	P7		V7	P8	V8	F0	P6	V9
Start of Repeated Data	seg		kPa	mm3	kPa	mm3	p poros arriba	mm
Etapas N°	Time since start of test	Time since start of stage	Radial Pressure	Radial volume	Back Pressure	Back Volume	Load Cell	Pore Pressure

Figura 38: Datos obtenidos con el programa GDS

Volumen muestra	altura muestra	Área muestra	Def	Def	Def	Def corte	Desviador	tensión	
mm ³	mm	mm ²	Vol	vert	radial	(2/3) (s _x -s _r)	q	vertical	p'
							kPa	kPa	kPa

Figura 39: Datos calculados para todos los ciclos de todas las etapas mediante los datos de la Figura 38

Desviador	Def corte	def calc	dif2	def corte	def corte	G''	G'''	q Δε	Ee
q									
kPa									

Figura 40: Datos calculados para los ciclos específicos seleccionados

Donde podemos ver que los datos medidos van a ser:

- T: La etapa en la que está el ensayo (Nº)
- t1: El tiempo desde el inicio del ensayo (seg)
- t2: El tiempo desde el inicio de la etapa (seg)
- P7: La presión radial/de cámara (kPa)
- V7: El volumen radial/de cámara (mm³)
- P8: La presión de cola (kPa)
- V8: El volumen del pistón de cola (mm³)
- F: Carga aplicada (kN)
- P6: La presión de poros (kPa)
- V9: El desplazamiento axial (mm)

Y los datos calculados para todos los puntos de las etapas mediante estos datos medidos son los siguientes:

- V(mm3): El volumen de la muestra, el cual se va a obtener con la siguiente fórmula

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

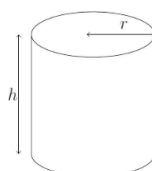


Figura 41: Figura esquemática para conocer el volumen de las muestras

- Ho(mm): La altura de la muestra, se va a obtener quitándole la diferencia de desplazamiento axial a la altura inicial de la muestra

- A(mm²): El área de la muestra, el volumen de la muestra entre la altura de la muestra en cada momento

$$A = \frac{V}{H_0}$$

- G_s (gr/cm³): Gravedad específica del suelo
- P_o (g): Peso inicial de la muestra justo antes de realizar el ensayo
- P_f (g): Peso final seco, después de realizar el ensayo
- ρ_n(gr/cm³): Densidad natural, la cual se obtiene con la relación del peso inicial y del volumen de la muestra

$$\rho = \frac{P_o}{V * 0.001}$$

- ρ_s(gr/cm³): Densidad seca la cual se obtiene con la relación del peso final y del volumen de la muestra

$$\rho = \frac{P_f}{V * 0.001}$$

- w(%): Humedad natural, la cual se obtiene con la relación entre la resta del peso inicial y final de la muestra y el peso final de la muestra

$$w = \frac{P_o - P_f}{P_f} * 100$$

- V_s (mm³): Volumen de sólido se obtiene relacionando el peso final seco de la muestra con la gravedad específica

$$V_s = \frac{P_f}{G_s} * 1000$$

- V_v (mm³): Volumen de vacíos el cual se obtiene restándole el volumen de sólido al volumen total del suelo

$$V_v = V - V_s$$

- e: Índice de vacíos se obtiene con la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de sólido

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

- V_w (mm³): Volumen de agua se obtiene con la relación entre el peso inicial y el peso seco final de la muestra ensayada

$$V_w = \frac{P_o - P_f}{0.001}$$

- S_r (%): Grado de saturación se obtiene con la relación del volumen de agua y el volumen de sólido de la muestra

$$S_r = \frac{V_w}{V_s} * 100$$

- ϵ_v : La deformación volumétrica de cada punto se va a obtener con la diferencia entre el volumen de muestra en ese punto y en el momento inicial, dividido por el volumen de muestra en el momento inicial

$$\epsilon_v = \frac{V - V_o}{V_o}$$

- ϵ_z : La deformación vertical de cada punto se va a obtener con la diferencia entre la altura de la muestra en ese punto y en el momento inicial, dividido por la altura de la muestra en el momento inicial

$$\epsilon_z = \frac{H - H_o}{H}$$

- ϵ_r : La deformación radial se obtiene mediante la mitad de la resta entre la deformación volumétrica y la deformación vertical

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_v - \epsilon_z}{2}$$

- ϵ_c : La deformación de corte se obtiene mediante dos tercios de la resta entre la deformación vertical y la deformación radial

$$\epsilon_c = \frac{2}{3} (\epsilon_z - \epsilon_r)$$

- q : El desviador en cada punto se va a calcular dividiéndole a la carga aplicada de ese punto entre el área de la muestra en ese punto multiplicada por 0.000001, para pasar el área a metros cuadrados

$$q = \frac{F_o}{A * 0.000001}$$

- p : La tensión vertical se calcula con la suma de la presión radial y el desviador

$$p = P_r + q$$

- p' : la tensión vertical efectiva se obtiene con un tercio de la suma entre la tensión vertical y dos veces la presión radial

$$p' = \frac{(P + 2P_r)}{3}$$

A continuación, se muestran los datos calculados solamente en fases específicas de cada etapa, las cuales son elegidas dependiendo de la deformación de corte y el desviador.

Se van a imponer unos valores a la hora de hacer cálculos, y utilizando la aplicación “solver” del programa Excel, se van a conseguir después los valores adecuados de los términos que pueden verse en la siguiente Figura 42:

$G_0 =$	28185.6179
$q_u =$	675.670806
$\varepsilon_{q0} =$	0.00023154

Figura 42: Datos impuestos calculados mediante el "solver" del programa Excel para cada etapa

- q^* : El desviador * se obtiene restándole al desviador calculado anteriormente el valor de desviador más pequeño en esa fase

$$q^* = q - q_0$$

- ε_{q^*} : La deformación de corte * se obtiene restándole a la deformación de corte calculada anteriormente por el valor de deformación de corte del mismo momento del que el desviador sea el más pequeño, igual que en el caso anterior

$$\varepsilon_{q^*} = \varepsilon_q - \varepsilon_{q0}$$

- ε_q^e : La deformación calculada la cual se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\varepsilon_q^e = \varepsilon_{q0}^e + \frac{\frac{q}{3G_0}}{1 - \frac{q}{q_u}}$$

- ε^2 : La diferencia al cuadrado de la deformación de corte y la deformación calculada

$$\varepsilon^2 = (\varepsilon_q^e - \varepsilon_{q^*})^2$$

- ε_q^{**} : La deformación de corte ** la cual se obtiene restándole la deformación impuesta a su etapa determinada la deformación de corte * calculada previamente

$$\varepsilon_q^{**} = \varepsilon_{q^*} - \varepsilon_{q0}$$

- ε_q^{***} : Deformación de corte *** la cual se obtiene restándole la deformación impuesta a su etapa determinada la deformación de corte calculada previamente

$$\varepsilon_q^{***} = \varepsilon_q^e - \varepsilon_{q0}$$

- G^{**} : Módulo de corte G^{**} se obtiene con la condición de que si la deformación de corte ** calculada previamente en mayor que cero, dividiéndole al desviador* el valor de la deformación de corte** tres veces

$$G^{**} = \frac{(q^*)}{3\varepsilon_{q^{**}}}$$

- G^{***} : Módulo de corte G^{***} se obtiene con la siguiente fórmula, con la condición de que la deformación de corte *** calculada previamente sea mayor que cero

$$G(\varepsilon_q^e - \varepsilon_{q0}^e) = \frac{1}{3} \frac{1}{\frac{1}{3G_0} - \frac{\varepsilon_q^e - \varepsilon_{q0}^e}{q_u}}$$

- $q^*\Delta e$ se calcula con la multiplicación entre la suma del valor obtenido del desviador* en su respectivo ciclo y el desviador* del ciclo siguiente, con la resta entre la deformación de corte* del siguiente ciclo con respecto al del respectivo ciclo, y todo esto entre dos.
- E_e : El módulo elástico se obtiene con la mitad de la multiplicación del desviador* y la deformación de corte **

$$E_e = \frac{\varepsilon q^{**}}{2q^*}$$

Una vez se tienen estos datos, se va a conseguir el valor del factor de amortiguamiento en cada etapa del ensayo, el cual se va a obtener de la siguiente forma:

$$D = \frac{(sum)q^*\Delta e}{E_e * \pi}$$

Primero se va a realizar un sumatorio de todos los valores de $q^*\Delta e$ de la etapa. Después, para obtener el factor de amortiguamiento, se va a dividir el valor del sumatorio mencionado, con el valor del módulo E_e calculado anteriormente multiplicado por π .

7.2. Resultados

Muestra 1

En esta primera Tabla 3, se pueden ver las masas medidas de las muestras antes del ensayo, una vez finalizado el ensayo y una vez secada la muestra.

Mediante estos pesos se van a calcular los datos de la Tabla 4 mediante los cálculos explicados en el capítulo “7.1 Obtención de resultados” de este documento. Puede verse que, con los cálculos realizados, la humedad natural real de la muestra es de 5.17%, es decir que el grado de saturación es de 20.69%.

Masa inicial (g)	146.74
Masa final (g)	145.12
Masa seca final (g)	139.52

Tabla 3: Masas de la muestra de 5% de humedad

DATOS DE LA MUESTRA Condiciones Iniciales	
Ho (mm)	76
Vo (mm ³)	86192.74
Area Inicial (mm ²)	1134.11
Peso de Suelo (g)	146.74
Gs (g/cm ³)	2.72
dens nat (g/cm ³)	1.70
W nat %	5.17
Vs (mm ³)	51294.12
Vv (mm ³)	34898.62
Indice de Vacios	0.68
Vw (mm ³)	7220
Sr (%)	20.69

Tabla 4: Datos de condiciones iniciales de la muestra de 5% de humedad

En primer lugar, se obtiene un gráfico de fuerza desviadora (kN)-desplazamiento vertical (mm) el cual nos muestra todas las etapas realizadas en el ensayo, como puede verse en la Figura 43. En este gráfico se ve que todas las etapas de carga tienen la misma inclinación. Se han realizado catorce etapas, de las cuales para hacer el cálculo han sido útiles las nueve últimas etapas, ya que la primera etapa ha servido para que la mencionada p' llegue a 200 kPa, y las siguientes cuatro etapas han servido para calibrar el equipo.

La muestra empieza con un desplazamiento vertical de 0 mm, pero a la mínima que se aplica una carga y hay fuerza desviadora (kN) el desplazamiento vertical va aumentando, hasta llegar a la decimocuarta etapa, donde la muestra no permite mayor desplazamiento vertical, que llega a un valor máximo de 31 mm, y la fuerza desviadora alcanza un valor de 1.1 kN.

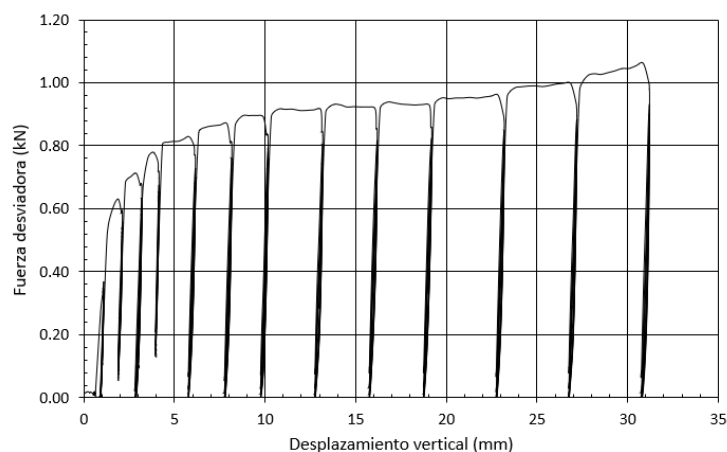


Figura 43: Relación fuerza desviadora-desplazamiento vertical de todas las etapas de una muestra de 5% de humedad

Después de obtener el gráfico que relaciona el desplazamiento vertical y la fuerza desviadora donde se ven todas las etapas del ensayo, se realiza un gráfico que relacione también la fuerza desviadora y el desplazamiento vertical, pero en este caso se va a hacer por cada etapa, y así se

pueden observar todos los diferentes ciclos que hay dentro de cada etapa. En la siguiente Figura 44, se presentan los ciclos realizados en la etapa 9 como ejemplo de este ensayo, pero en el los Anexos de este presente documento se van a representar todas las demás relaciones del resto de etapas.

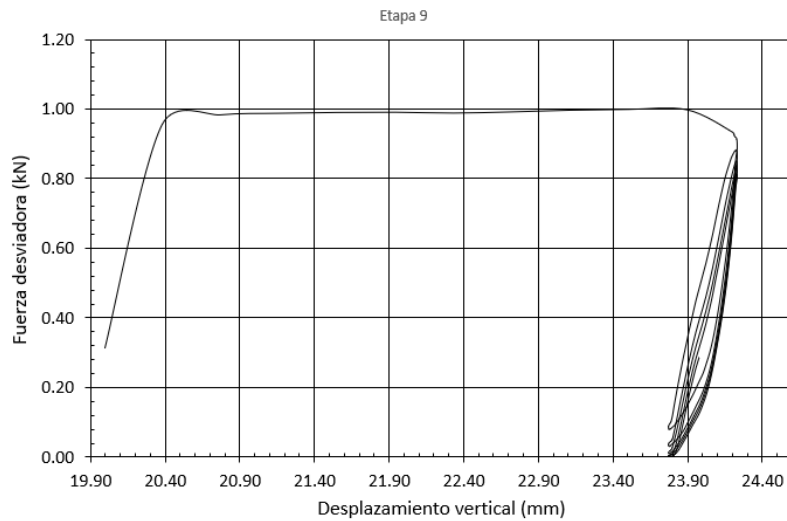


Figura 44: Relación fuerza desviadora- desplazamiento vertical de la etapa 9 de una muestra de 5% de humedad

Después, hay que hacer la relación entre la deformación de corte y el desviador de cada uno de los ciclos mencionados, probando cuál de ellos tiene mejor relación y una curva más clara. En la Figura 45 puede verse la curva conseguida de la etapa 9, en la cual puede observarse que los extremos no son totalmente limpios, cuando menor es la deformación de corte, cosa que puede hacer que más adelante los cálculos realizados puedan variar un poco.

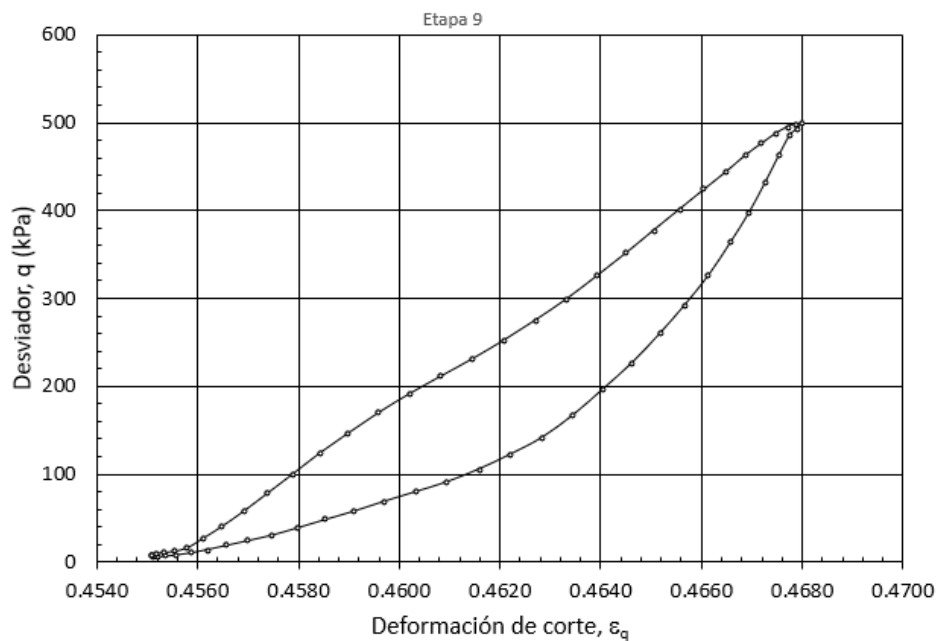


Figura 45: Relación desviador-deformación de corte de un ciclo de la etapa 9 de una muestra de 5% de humedad

Una vez escogido el ciclo más adecuado, mencionado en la Figura 45, se muestra la relación entre el módulo elástico de corte G (kPa) y la deformación de corte. Este análisis se realiza a partir del crecimiento de los valores de p' , y pueden verse en ella tanto los resultados obtenidos con los cálculos de la deformación de corte** (que equivale a la línea negra de “medidas”), como a la obtenida mediante los cálculos con la deformación de corte*** (que equivale a la línea roja de “ajuste”). Esto puede verse en la Figura 46.

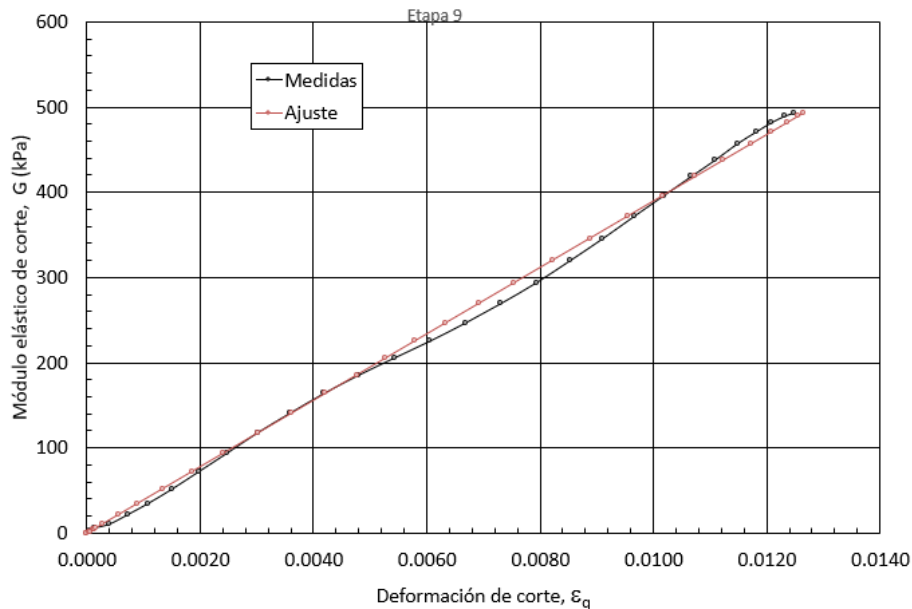


Figura 46: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de un ciclo de la etapa 9 de una muestra de 5% de humedad

A continuación, en la Figura 47 se relacionan también el módulo elástico de corte G (kPa) y la deformación de corte, pero en este caso, la línea negra equivalente a “medidas” se realiza con el módulo de corte G^{**} calculado, y la línea roja equivalente a “ajuste” se obtiene con el módulo de corte G^{***} .

Se ve que hay una diferencia entre las medidas tomadas y el ajuste realizado, esto ocurre por lo mencionado anteriormente de que, en caso de deformaciones muy pequeñas, en la curva de la Figura 45 hay una pequeña anomalía, por lo que hay que tener en cuenta valores mayores a 0.002 de deformación de corte, que es el punto donde tanto las medidas como los ajustes realizados son coherentes.

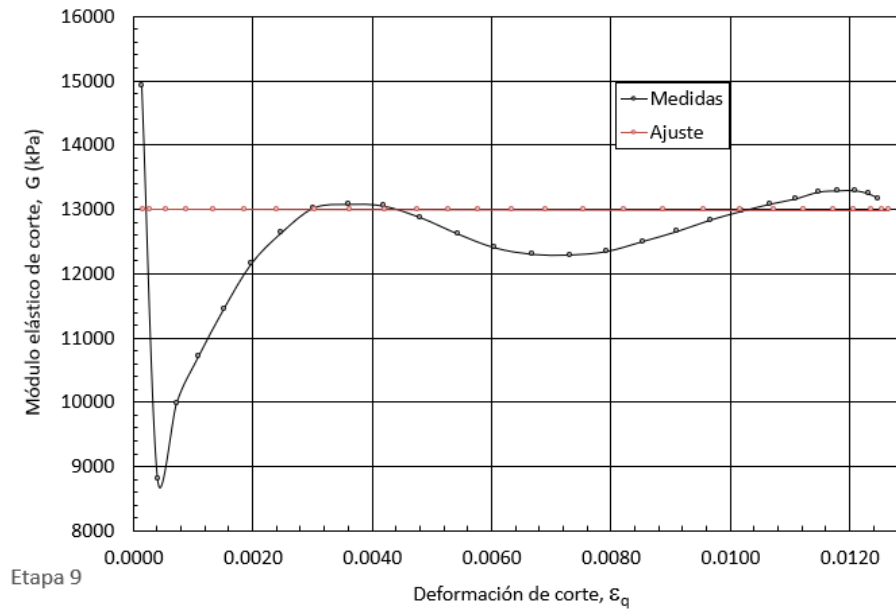


Figura 47: Relación de módulo de corte ** y módulo de corte ***- deformación de corte de un ciclo de la etapa 9 de una muestra de 5% de humedad

En la Figura 48 puede verse un gráfico, similar al gráfico de la Figura 47, con la diferencia de que, en este caso, el eje de la deformación de corte está en escala logarítmica, y que también aparecen los valores obtenidos para una muestra con las mismas características en el equipo de columna resonante (Canseco, 2019).

Teniendo en cuenta que el equipo de la columna resonante puede trabajar con un rango de menores dimensiones de la deformación de corte y el equipo triaxial con un rango algo mayor, tomando en cuenta como punto de referencia el valor de 0.001 de deformación de corte para ambos casos, donde los datos más fiables de la columna resonante serán los que tengan un valor menor al mencionado y los valores del equipo triaxial los que estén por encima del valor mencionado, puede apreciarse que ambos equipos proporcionan la misma tendencia en el valor del módulo de corte en función de la deformación de corte aplicada. Esto es que, el módulo elástico de corte G (kPa) disminuye a medida que la deformación de corte aumenta.

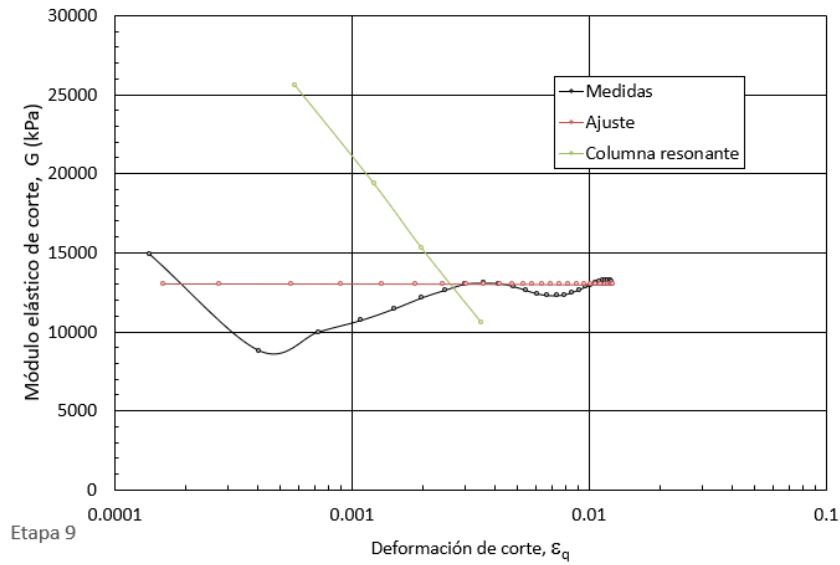


Figura 48: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de un ciclo de una etapa 9 de una muestra de 5% de humedad, y comparación con muestra ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019)

En la Figura 47 se puede ver un gráfico que relaciona el factor de amortiguamiento D y la deformación de corte de la muestra ensayada mediante el equipo triaxial, comparándolo con los resultados obtenidos de una muestra con las mismas características en el equipo de columna resonante (Canseco, 2019). Se puede apreciar que los valores obtenidos en ambos equipos concuerdan, siendo el factor de amortiguamiento mayor a medida que la deformación de corte aumenta.

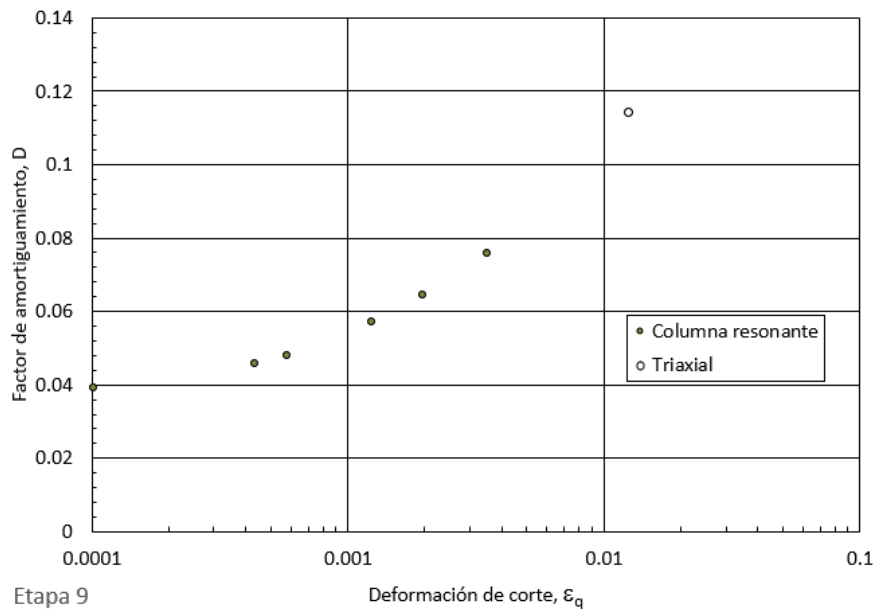


Figura 49: Relación factor de amortiguamiento-deformación de corte de una muestra de 5% de humedad ensayada en triaxial y en columna resonante (Canseco, 2019)

Muestra 2

En la Tabla 5, se pueden ver las masas medidas de las muestras antes de realizar el ensayo, una vez finalizado el ensayo y una vez secada la muestra. Mediante estos pesos se van a calcular los datos de la Tabla 6 mediante los cálculos explicados en el capítulo “7.1 Obtención de resultados” de este documento. Puede verse que, con los cálculos realizados, la humedad natural real de la muestra es de 10.25%, por lo que el grado de saturación es de 40.95%.

Masa inicial (g)	153.76
Masa final (g)	152.85
Masa seca final (g)	139.46

Tabla 5: Masas de la muestra de 10% de humedad

DATOS DE LA MUESTRA Condiciones Iniciales	
Ho (mm)	76
Vo (mm ³)	86192.74
Area Inicial (mm ²)	1134.11
Peso de Suelo (g)	153.76
Gs (g/cm ³)	2.72
dens nat (g/cm ³)	1.78
W nat %	10.25
Vs (mm ³)	51272.06
Vv (mm ³)	34920.68
Indice de Vacios	0.68
Vw (mm ³)	14300
Sr (%)	40.95

Tabla 6: Datos de condiciones iniciales de la muestra de 10% de humedad

En la Figura 50 se puede ver el gráfico obtenido relacionando la fuerza desviadora (kN) y el desplazamiento vertical (mm) el cual nos muestra todas las etapas realizadas en el ensayo. En este ensayo se han realizado 15 etapas, de las cuales la primera se ha utilizado para que p' llegue a 200 kPa, las seis siguientes etapas son las que han servido para obtener cálculos, después se puede apreciar en el gráfico que hay dos etapas mal calibradas en mitad del ensayo que no se ha utilizado para obtener resultados, y después se han usado las siguientes tres etapas de nuevo para conseguir resultados. Las cuatro últimas no han servido para realizar cálculos porque en ellas no ha habido ningún cambio de deformación axial, es decir, que la muestra ya ha colapsado en ese punto de fuerza utilizada y desplazamiento vertical realizado.

La muestra empieza con un desplazamiento vertical de 0 mm, pero en cuanto se aplica una carga y hay fuerza desviadora (kN) el desplazamiento vertical va aumentando, hasta llegar a la undécima etapa, donde la muestra no permite mayor desplazamiento vertical, que llega a un valor máximo de 21 mm, y la fuerza desviadora alcanza un valor de 1 kN.

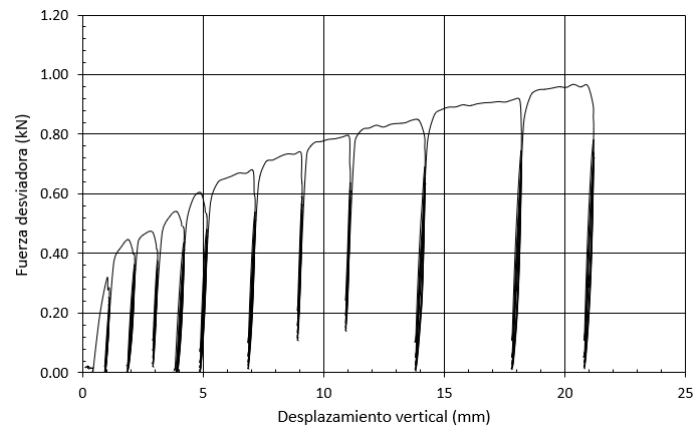


Figura 50:: Relación fuerza desviadora-desplazamiento vertical de todas las etapas de una muestra de 10% de humedad

A continuación, se relacionan otra vez el desplazamiento vertical y la fuerza desviadora, pero esta vez haciendo hincapié en una sola etapa, en el caso de la Figura 51, la etapa 5 de este ensayo, donde pueden apreciarse los ciclos de carga realizados en ella. El resto de etapas de este ensayo de la muestra con 10% de humedad están ilustradas en el capítulo 12 de Anexos de este documento.

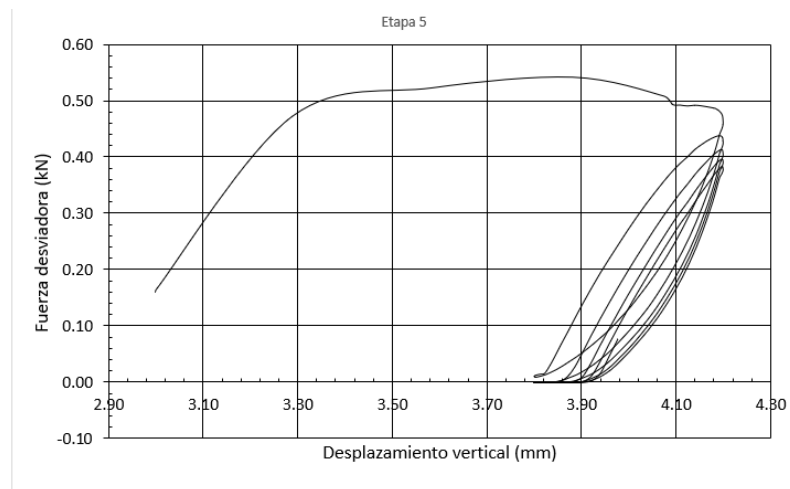


Figura 51:Relación fuerza desviadora- desplazamiento vertical de la etapa 5 de una muestra de 10% de humedad

Una vez hecho eso, se realiza una relación entre la deformación de corte y el desviador de cada uno de los ciclos mencionados en la Figura 51, y probando cuál de ellos tiene mejor relación y una curva más clara se escoge uno de los ciclos. En la Figura 52 puede verse la curva conseguida de la etapa 5, en la cual puede verse que puede ocurrir algún cálculo erróneo, a causa de la anomalía que hay en el extremo izquierdo, es decir, cuando la deformación de corte es menor.

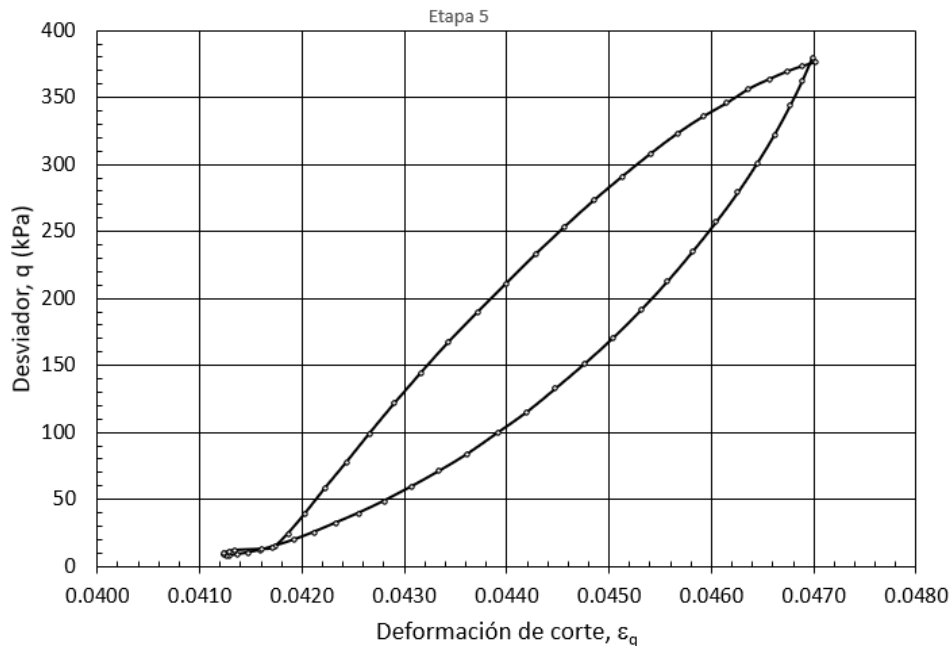


Figura 52: Relación desviador-deformación de corte de un ciclo de la etapa 5 de una muestra de 10% de humedad

Una vez está escogido el ciclo, se realiza la relación entre el módulo elástico de corte G (kPa) y la deformación de corte, la cual se lleva a cabo a partir del crecimiento de los valores de p' , y pueden verse en ella tanto los resultados obtenidos mediante los cálculos con la deformación de corte *** (la línea roja de "ajuste"), como los obtenidos con los cálculos de la deformación de corte ** (la línea negra de "medidas"), como puede verse en la Figura 53.

Se aprecia la anomalía mencionada anteriormente en los puntos de deformación de corte de valor bajo, entre los resultados obtenidos de las medidas y de los ajustes realizados, donde, a medida que aumenta la deformación de corte, los resultados de las medidas y el ajuste son más parecidos.

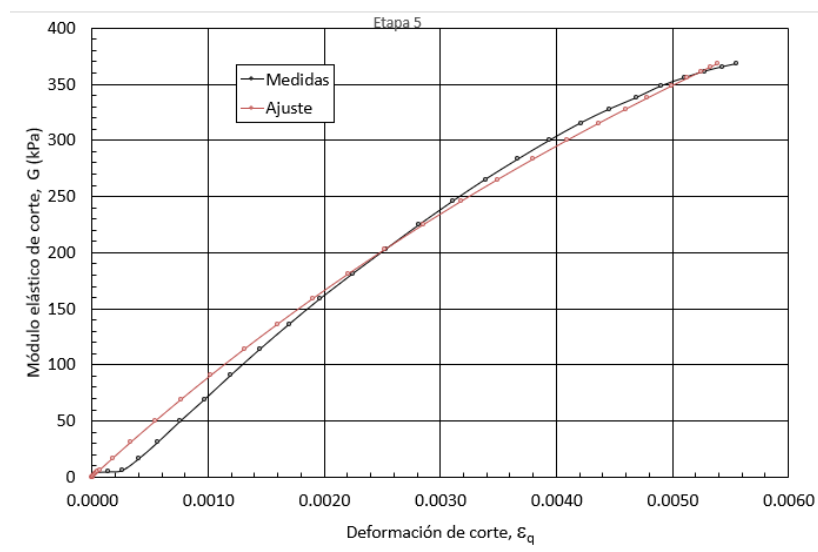


Figura 53: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de un ciclo de la etapa 5 de una muestra de 10% de humedad

En la Figura 54 se relacionan de nuevo el módulo elástico de corte G (kPa) y la deformación de corte, pero en este caso, la línea roja equivalente a “ajuste” se obtiene con el módulo de corte G^{***} y la línea negra equivalente a “medidas” se realiza con el módulo de corte G^{**} calculado.

Se ve que hay una diferencia entre las medidas tomadas y el ajuste realizado. Esto ocurre por la anomalía mencionada anteriormente, por lo que hay que tener en cuenta valores mayores a 0.0022 de deformación de corte, que es el punto donde tanto las medidas como los ajustes realizados son coherentes, ya que los valores menores a ese punto de deformación de corte nos dan unos resultados muy diferentes.

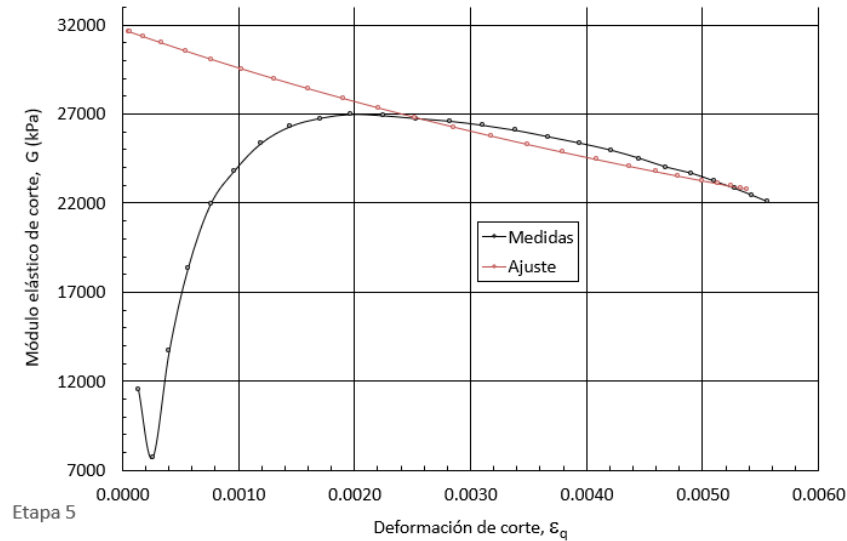


Figura 54: Relación de módulo de corte ** y módulo de corte *** - deformación de corte de un ciclo de la etapa 5 de una muestra de 10% de humedad

En la siguiente Figura 55 puede verse un gráfico que relaciona el módulo elástico de corte G (kPa) y la deformación de corte en escala logarítmica tanto de los resultados obtenidos en el equipo triaxial como en el equipo de columna resonante. Hay que tener en cuenta que el equipo de columna resonante trabaja con un rango de menores valores de la deformación de corte y el equipo triaxial con un rango mayor. Se puede apreciar que los dos equipos proporcionan la misma tendencia en los parámetros medidos, donde, el módulo elástico de corte G (kPa) disminuye a medida que la deformación de corte aumenta. Aunque en las medidas tomadas con el equipo triaxial pueda verse una anomalía donde el módulo elástico de corte G (kPa) aumenta hasta un punto, y después empieza a disminuir, cabe recalcar que el equipo triaxial toma medidas más fiables para valores de deformación de corte mayores, por lo que los datos a tener en cuenta vendrían a ser esos que están a partir del valor de 0.001 de deformación de corte.

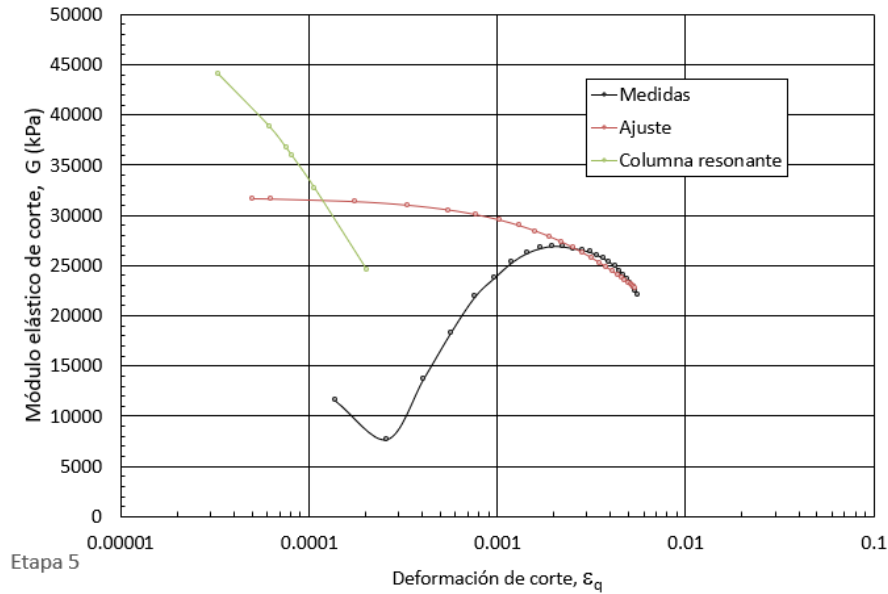


Figura 55: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de un ciclo de una etapa 5 de una muestra de 10% de humedad, y comparación con muestra ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019)

En la Figura 56 se puede ver un gráfico que relaciona el factor de amortiguamiento D y la deformación de corte de la muestra ensayada mediante el equipo triaxial, el cual se compara también con los valores de factor de amortiguamiento D obtenidos mediante el equipo de columna resonante (Canseco, 2019). Se puede apreciar que, a medida que el valor de deformación de corte aumenta, el valor de factor de amortiguamiento D también aumenta, viendo además que los valores obtenidos con el equipo de columna resonante concuerdan perfectamente con el valor obtenido mediante el equipo triaxial.

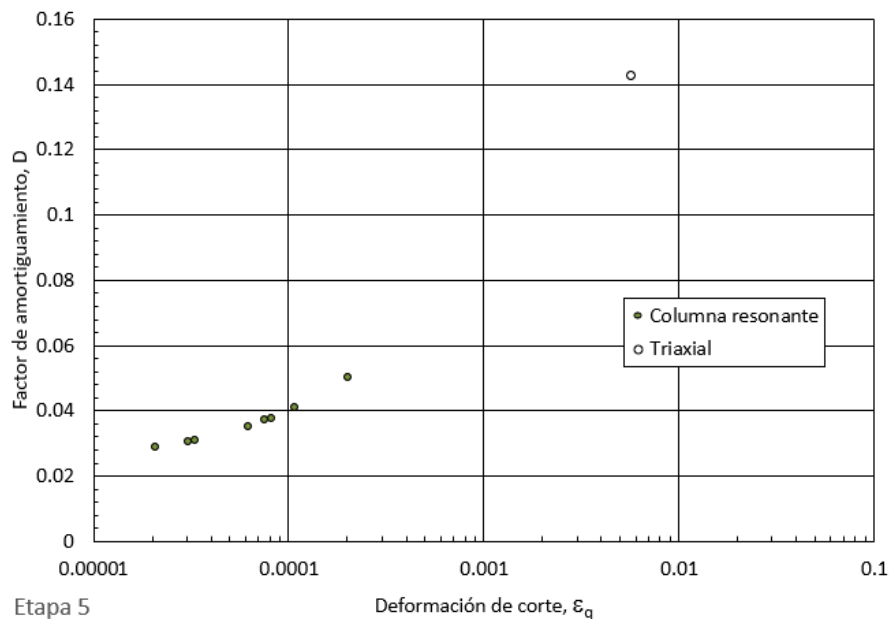


Figura 56: Relación factor de amortiguamiento-deformación de corte de una muestra de 10% de humedad ensayada en triaxial y en columna resonante (Canseco, 2019)

Muestra 3

En la Tabla 7, se pueden ver las masas medidas de las muestras antes de realizar el ensayo, una vez finalizado el ensayo y una vez secada la muestra. Mediante estos pesos se van a calcular los datos de la Tabla 8 mediante los cálculos explicados en el capítulo “7.1 Obtención de resultados” de este documento.

Se puede apreciar que la humedad natural real de la muestra ensayada es de 14.81%, por lo que el grado de saturación es de 59%.

Masa inicial (g)	159.97
Masa final (g)	158.45
Masa seca final (g)	139.34

Tabla 7: Masas de la muestra de 15% de humedad

DATOS DE LA MUESTRA	
Condiciones Iniciales	
Ho (mm)	76
Vo (mm ³)	86192.74
Area Inicial (mm ²)	1134.11
Peso de Suelo (g)	159.97
Gs (g/cm ³)	2.72
dens nat (g/cm ³)	1.86
W nat %	14.81
Vs (mm ³)	51227.94
Vv (mm ³)	34964.79
Indice de Vacios	0.68
Vw (mm ³)	20630
Sr (%)	59.00

Tabla 8: Datos de condiciones iniciales de la muestra de 15% de humedad

En primer lugar, se obtiene un gráfico de fuerza desviadora (kN)-desplazamiento vertical (mm) el cual nos muestra todas las etapas realizadas en el ensayo, como puede verse en la Figura 57. En este gráfico se ve que todas las etapas de carga tienen la misma inclinación. Se han realizado ocho etapas, de las cuales para hacer el cálculo han sido útiles las cuatro últimas, ya que la primera etapa ha servido para que p' llegue a 200 kPa, y las siguientes tres etapas han servido para calibrar el equipo.

La muestra empieza con un desplazamiento vertical de 0 mm, pero en cuanto se aplica una carga y hay fuerza desviadora (kN) el desplazamiento vertical va aumentando, hasta llegar a la octava etapa, donde la muestra no permite mayor desplazamiento vertical.

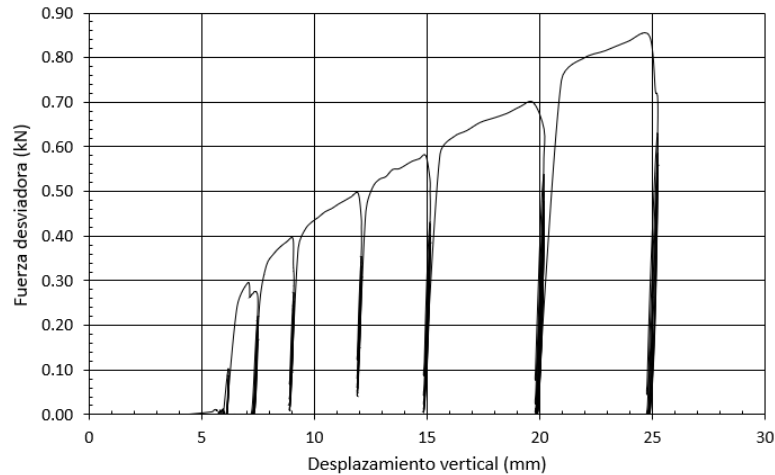


Figura 57: Relación fuerza desviadora-desplazamiento vertical de todas las etapas de una muestra de 15% de humedad

Después, por cada etapa se van a obtener los siguientes gráficos, empezando por el gráfico de la Figura 58 entre la fuerza desviadora (kN) y el desplazamiento vertical (mm), en el cual pueden verse los ciclos realizados en esa etapa específica. En este apartado se van a mostrar los resultados de la etapa 5, y el resto de etapas se ven reflejadas en el capítulo 12 de Anexos del presente documento.

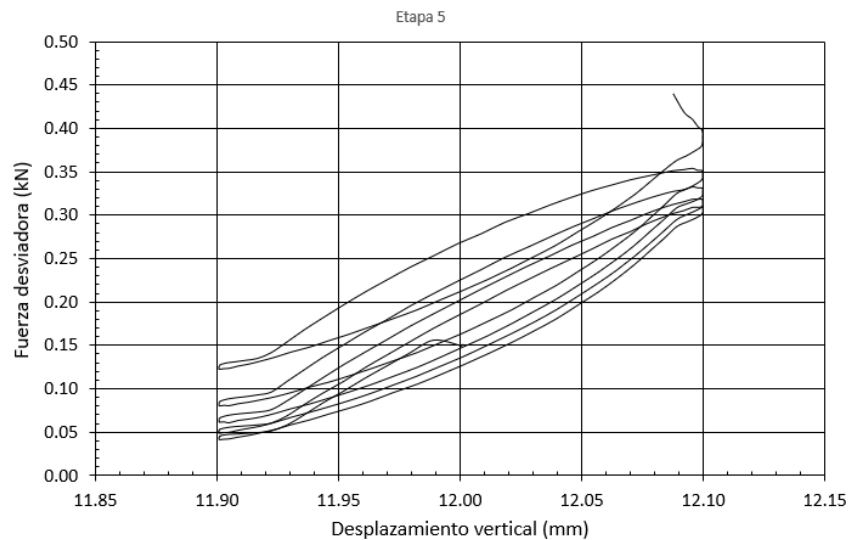


Figura 58: Relación fuerza desviadora- desplazamiento vertical de la etapa 5 de una muestra de 15% de humedad

A continuación, hay que escoger uno de los ciclos mencionados previamente, haciendo pruebas con todos los ciclos, viendo qué relación entre el desviador (kPa) y la deformación de corte es la más adecuada, como puede verse en la siguiente Figura 59.

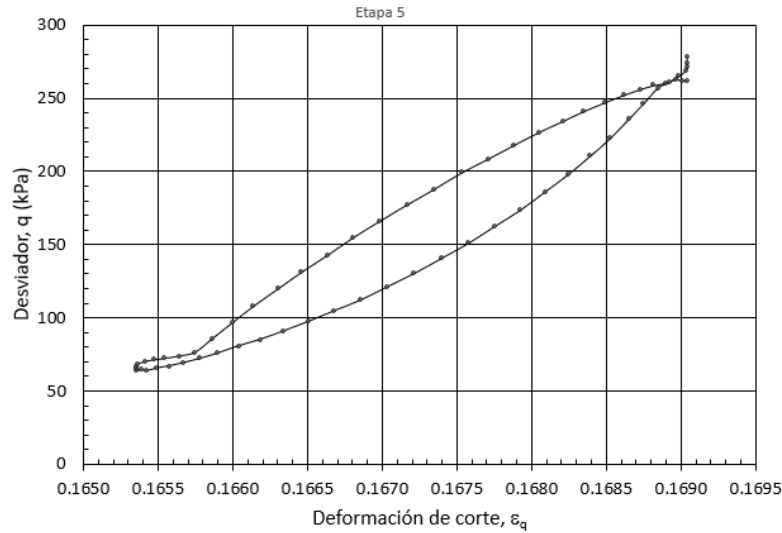


Figura 59: Relación desviador-deformación de corte de un ciclo de la etapa 5 de una muestra de 15% de humedad

Una vez se tenga el ciclo más adecuado, en la Figura 60, se muestra la relación entre el módulo elástico de corte G (kPa) y la deformación de corte, la cual se realiza a partir del crecimiento de los valores de p' , y pueden verse en ella tanto la obtenida con los cálculos de la deformación de corte** mencionada anteriormente (línea negra de “medidas”), como a la obtenida mediante los cálculos con la deformación de corte *** (línea roja de “ajuste”).

En el gráfico puede verse una pequeña diferencia al inicio de la curva entre medidas y ajuste, y esta diferencia viene de que la curva del gráfico que relaciona el desviador (kPa) y la deformación de corte de la Figura 59 no es completamente limpia, ya que en los extremos tiene esa pequeña deformidad.

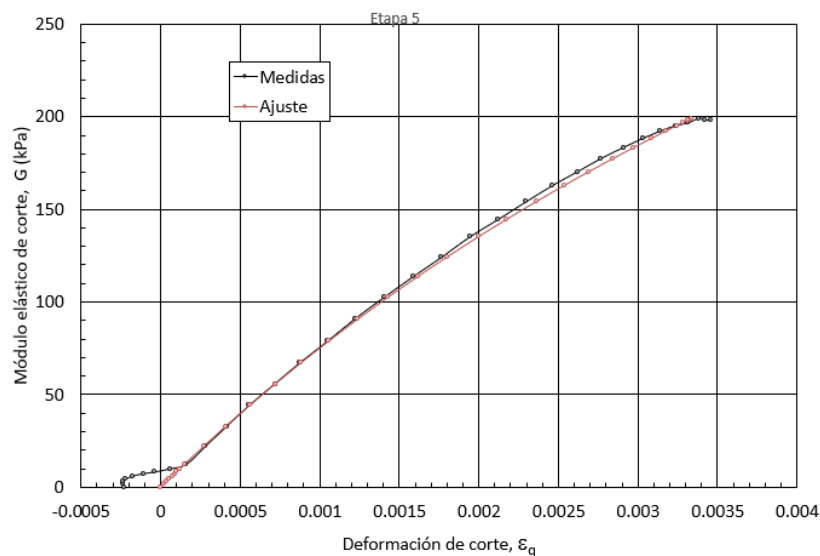


Figura 60: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de un ciclo de la etapa 5 de una muestra de 15% de humedad

La siguiente relación mostrada en la Figura 61, también es entre el módulo elástico de corte G (kPa) y la deformación de corte, pero en este caso, la línea negra equivalente a “medidas” se realiza con el módulo de corte G^{**} calculado, y la línea roja equivalente a “ajuste” se obtiene con el módulo de corte G^{***} .

En este caso, se ve también que hay una diferencia entre las medidas tomadas y el ajuste realizado, esto ocurre cuando la deformación de corte es muy pequeña, pero a medida que aumenta la deformación de corte las medidas y los ajustes son más similares, y por lo tanto los valores que se obtengan más adelante del factor de amortiguamiento serán más fiables cuando la deformación de corte esté entre esos valores en los que las medidas y ajustes sean similares.

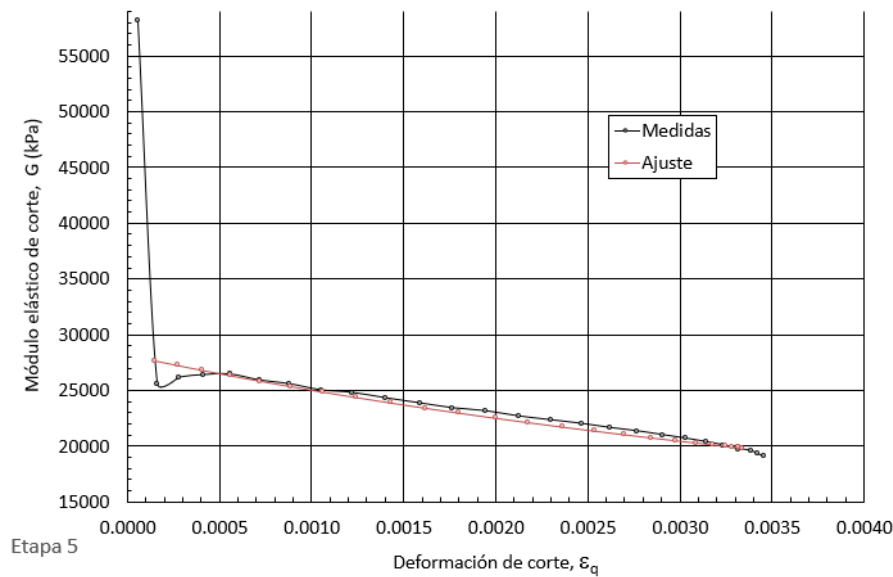


Figura 61: Relación de módulo de corte G^{**} y módulo de corte G^{***} - deformación de corte de un ciclo de la etapa 5 de una muestra de 15% de humedad

El siguiente gráfico de la Figura 62 es igual que el gráfico de la Figura 61, solo que en este caso la deformación de corte se visualiza en escala logarítmica, y además de ver la relación tanto de los valores medidos como de los ajustes hechos, puede verse también el resultado obtenido para la misma muestra en el equipo de columna resonante, tomado de Canseco (2019). En este caso también puede verse diferencia entre las medidas tomadas y el ajuste realizado, igual que en el caso anterior, cuando la deformación de corte es baja.

Teniendo en cuenta como punto de referencia el valor de 0.0003 de deformación de corte para ambos casos, se puede apreciar que ambos equipos llevan la misma dirección y trayectoria, es decir, que el módulo elástico de corte G (kPa) disminuye a medida que la deformación de corte aumenta.

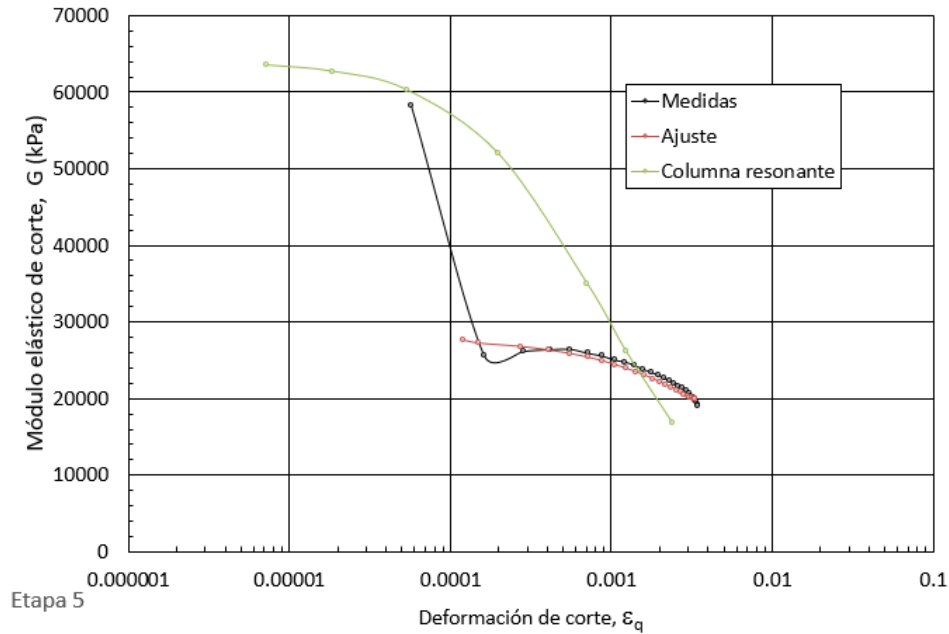


Figura 62: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de un ciclo de una etapa 5 de una muestra de 15% de humedad, y comparación con muestra ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019)

Por último, en la Figura 63, puede verse la relación entre la deformación de corte y el factor de amortiguamiento del suelo, en este caso, también comparando el valor de factor de amortiguamiento obtenido con este ensayo y los valores obtenidos en el equipo de columna resonante. Se puede observar que el valor de factor de amortiguamiento D aumenta a medida que el valor de deformación de corte aumenta, y que, además, los valores obtenidos con el equipo de columna resonante concuerdan perfectamente con el valor obtenido mediante el equipo triaxial.

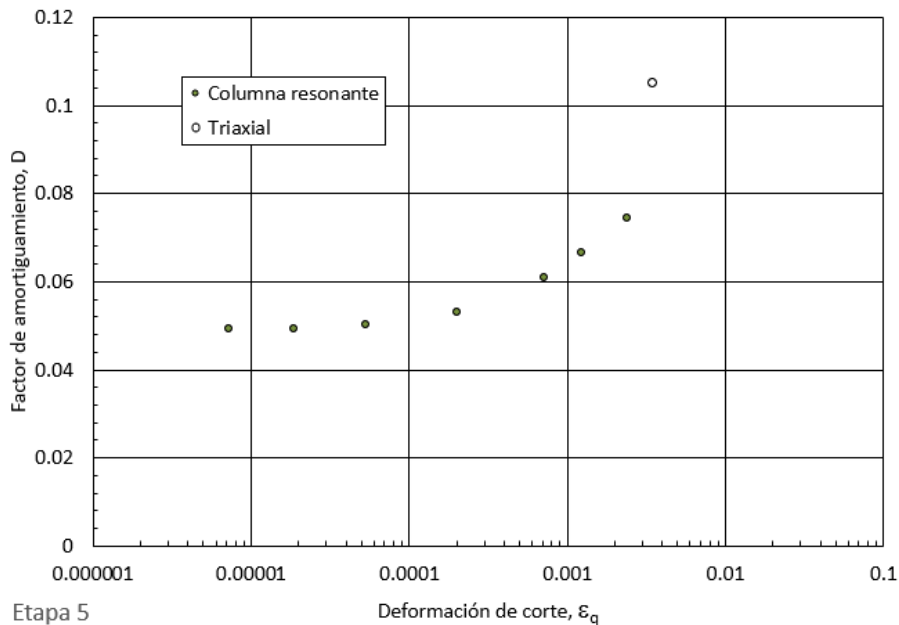


Figura 63: Relación factor de amortiguamiento-deformación de corte de una muestra de 15% de humedad ensayada en triaxial y en columna resonante (Canseco, 2019)

Muestra 4

En la siguiente Tabla 9, se pueden ver las masas medidas de las muestras antes de realizar el ensayo, una vez finalizado el ensayo y una vez secada la muestra.

Mediante estos pesos se van a calcular los datos de la Tabla 10 mediante los cálculos explicados en el capítulo “7.1 Obtención de resultados” de este documento.

Se observa que la humedad natural real de la muestra ensayada es de 19.95%, por lo que el grado de saturación es de 80.16%.

Masa inicial (g)	167.70
Masa final (g)	166.99
Masa seca final (g)	139.81

Tabla 9: Masas de la muestra de 20% de humedad

DATOS DE LA MUESTRA Condiciones Iniciales	
Ho (mm)	76
Vo (mm ³)	86192.74
Area Inicial (mm ²)	1134.11
Peso de Suelo (g)	167.7
Gs (g/cm ³)	2.72
dens nat (g/cm ³)	1.95
W nat %	19.95
Vs (mm ³)	51400.74
Vv (mm ³)	34792.00
Indice de Vacios	0.68
Vw (mm ³)	27890
Sr (%)	80.16

Tabla 10: Datos de condiciones iniciales de la muestra de 20% de humedad

Igual que en los casos de ensayos anteriores, aquí también se obtiene un gráfico relacionando la fuerza desviadora (kN) y el desplazamiento vertical (mm) el cual nos muestra todas las etapas realizadas en el ensayo, como puede verse en la Figura 64. En este gráfico se ve que todas las etapas de carga tienen la misma inclinación.

Se han realizado doce etapas, de las cuales para hacer el cálculo han sido útiles las nueve últimas, ya que la primera etapa ha servido para que p´ llegue a 200 kPa, y las dos siguientes etapas han servido para calibrar el equipo.

La muestra empieza con un desplazamiento vertical de 0 mm y una fuerza desviadora de 0.01 kN, pero a la mínima que se aplica una carga y hay fuerza desviadora (kN) el desplazamiento vertical va aumentando hasta un valor máximo de 25 mm y una fuerza desviadora de 0.08 kN.

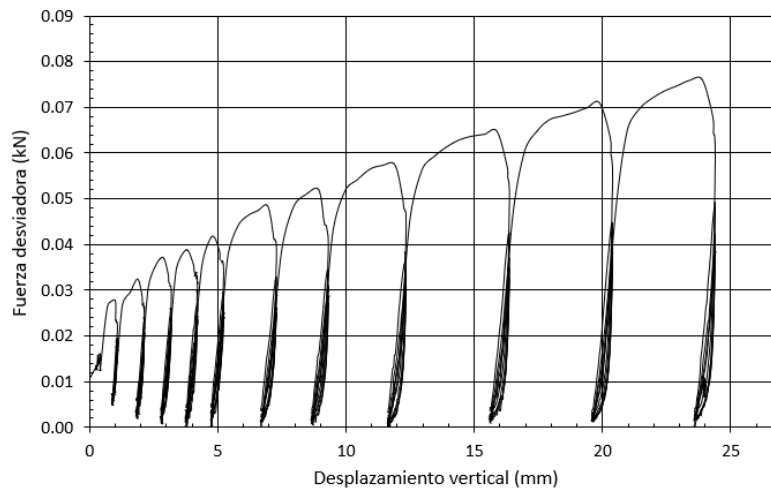


Figura 64: Relación fuerza desviadora-desplazamiento vertical de todas las etapas de una muestra de 20% de humedad

Después de obtener el gráfico que relaciona el desplazamiento vertical y la fuerza desviadora donde se ven todas las etapas del ensayo, se realiza un gráfico que también relacione la fuerza desviadora y el desplazamiento vertical, pero en este caso se va a hacer una especificación de esa relación por cada etapa, para poder ver todos los ciclos que hay dentro de cada etapa. En la siguiente Figura 65, se presentan los ciclos realizados en la etapa 11 como ejemplo de este ensayo, pero en el capítulo 12 de Anexos de este documento se representan todas las demás relaciones del resto de etapas.

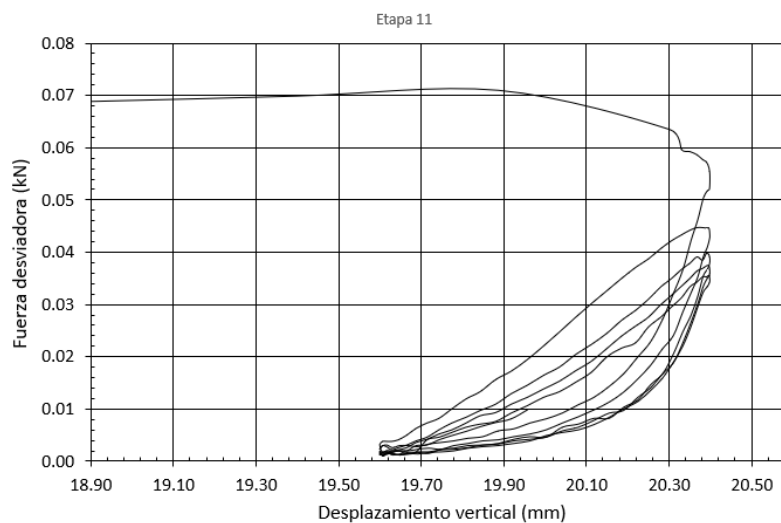


Figura 65: Relación fuerza desviadora- desplazamiento vertical de la etapa 11 de una muestra de 20% de humedad

Posteriormente, hay que elaborar las gráficas de deformación de corte y el desviador de cada uno de los ciclos mencionados, probando cuál de ellos tiene mejor relación y que tenga una curva más clara. En la Figura 66 puede verse la curva conseguida de la etapa 11, en la cual puede verse que los extremos no son totalmente limpios, sobre todo el extremo izquierdo, donde la

deformación de corte es menor, cosa que puede hacer que más adelante los cálculos realizados puedan variar un poco.

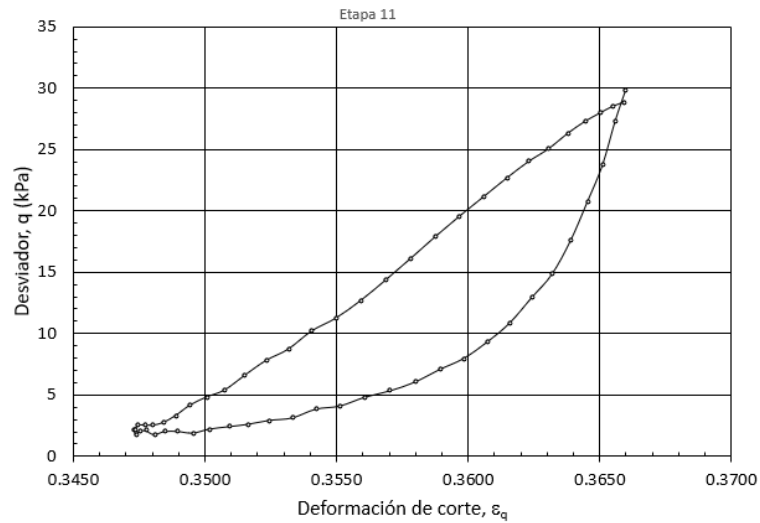


Figura 66: Relación desviador-deformación de corte de un ciclo de la etapa 11 de una muestra de 20% de humedad

Una vez escogido el ciclo más adecuado, mencionado en la Figura 66, se muestra la relación entre el módulo elástico de corte G (kPa) y la deformación de corte, la cual se realiza a partir del crecimiento de los valores de p' , y pueden verse en ella tanto los resultados obtenidos mediante los cálculos con la deformación de corte *** (línea roja de "ajuste"), como los resultados obtenidos con los cálculos de la deformación de corte** (línea negra de "medidas"). Esto se puede ver en la siguiente Figura 67.

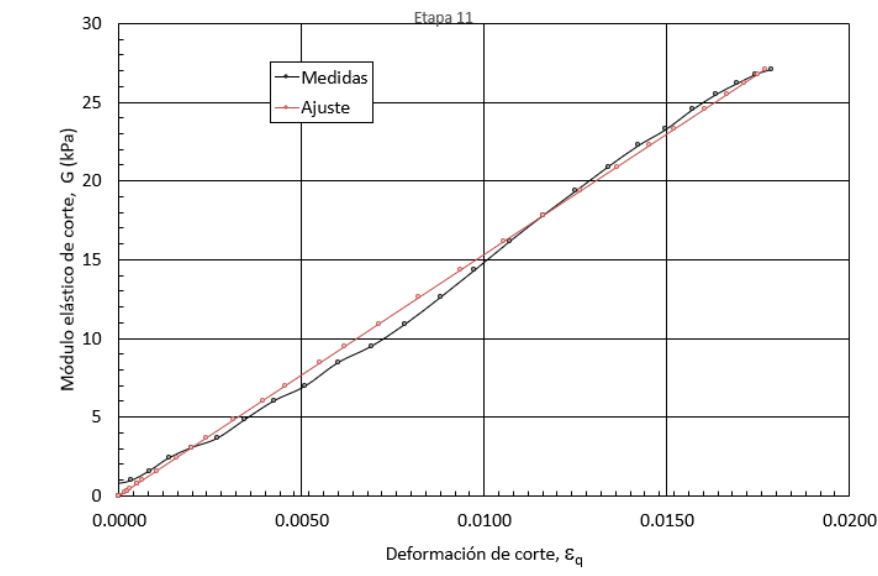


Figura 67: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de un ciclo de la etapa 11 de una muestra de 20% de humedad

A continuación, en la Figura 68 se relacionan también la deformación de corte y el módulo elástico de corte G (kPa), pero en este caso, la línea negra equivalente a “medidas” se realiza con el módulo de corte G^{**} calculado, y la línea roja equivalente a “ajuste” se obtiene con el módulo de corte G^{***} .

Se observa que hay una diferencia entre las medidas tomadas y el ajuste realizado, esto ocurre por lo mencionado anteriormente de que, en caso de deformaciones muy pequeñas, en la curva mostrada en la Figura 66 hay una pequeña anomalía, por lo que hay que tener en cuenta valores mayores a 0.01 de deformación de corte, que es el punto donde tanto las medidas como los ajustes realizados son más parecidos a medida que la deformación de corte cambia.

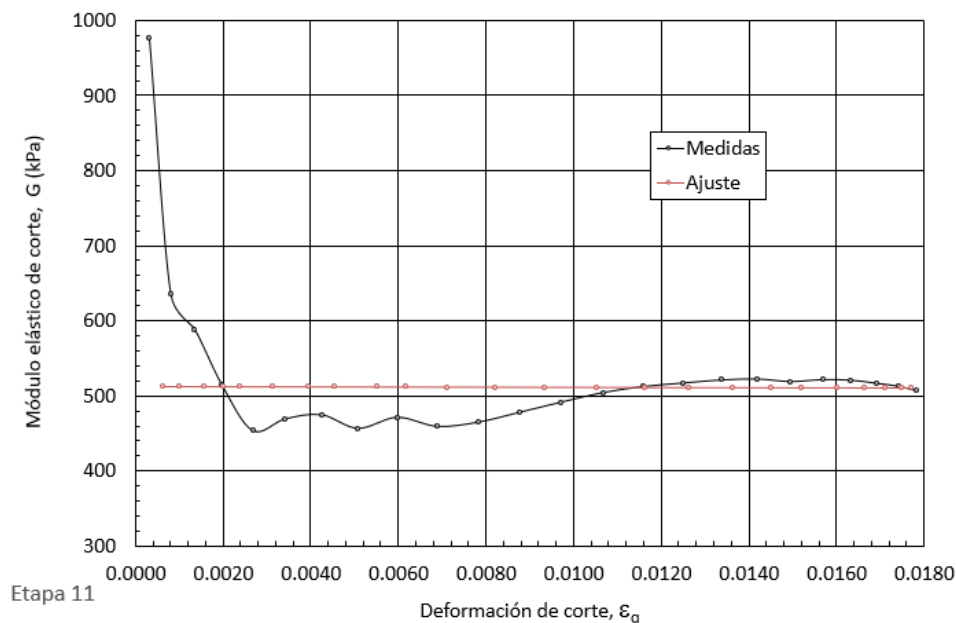


Figura 68: Relación de módulo de corte G^{**} y módulo de corte G^{***} - deformación de corte de un ciclo de la etapa 11 de una muestra de 20% de humedad

En la Figura 69 puede verse un gráfico, similar al gráfico de la Figura 68, pero con el eje de la deformación de corte en escala logarítmica. También, en este gráfico aparecen además de los resultados obtenidos con el equipo triaxial, los valores obtenidos para una muestra con las mismas características en el equipo de columna resonante (Canseco, 2019).

A medida que la deformación de corte crece, las medidas y los ajustes son similares, y además puede verse que, en cuanto a las medidas tomadas con la columna resonante sobre una muestra igual a la ensayada en el equipo triaxial, si se siguiera aumentando la deformación de corte, llevaría la misma tendencia que los resultados obtenidos con la muestra ensayada en el equipo triaxial. Esto es que, a medida que la deformación de corte aumenta, el módulo elástico de corte G (kPa) disminuye.

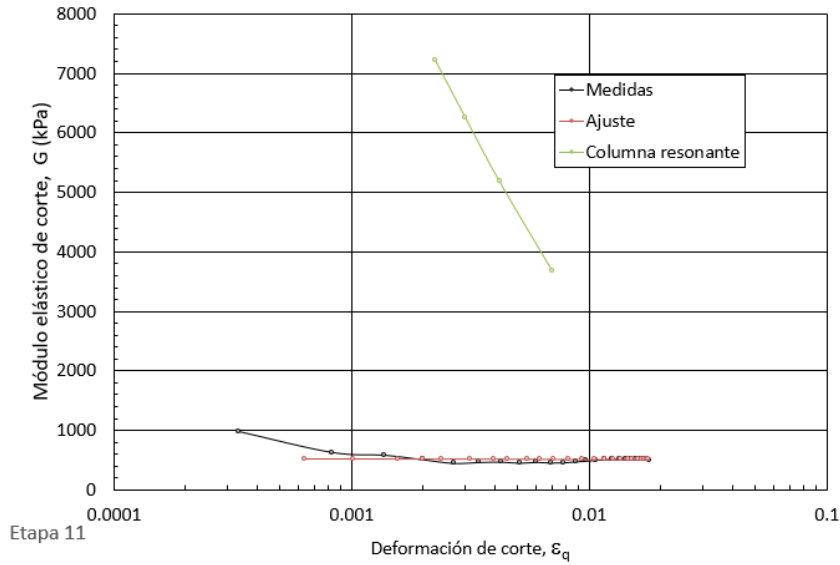


Figura 69: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de un ciclo de una etapa 11 de una muestra de 20% de humedad, y comparación con muestra ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019)

En el gráfico de la siguiente Figura 70 se puede ver un gráfico que relaciona el factor de amortiguamiento D y la deformación de corte de la muestra ensayada mediante el equipo triaxial, el cual se compara también con los valores de factor de amortiguamiento D obtenidos mediante el equipo de columna resonante. Se puede apreciar que, a medida que el valor de deformación de corte aumenta, el valor de factor de amortiguamiento D también aumenta, viendo además que los valores obtenidos con el equipo de columna resonante concuerdan perfectamente con el valor obtenido mediante el equipo triaxial.

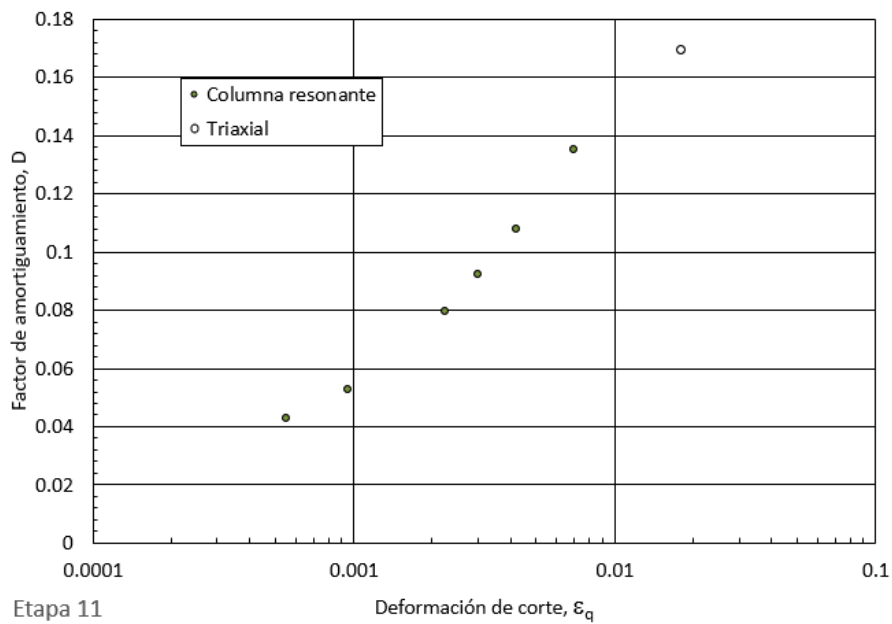


Figura 70: Relación factor de amortiguamiento-deformación de corte de una muestra de 20% de humedad ensayada en triaxial y en columna resonante (Canseco, 2019)

Muestra 5

En el caso de la muestra saturada, es difícil saber exactamente el peso de la muestra antes de ser ensayada, ya que la misma muestra se satura en el equipo triaxial y después se ensaya directamente en el mismo lugar. Sin embargo, sabiendo que está totalmente saturada, se ha realizado un cálculo para saber cuál ha sido el peso necesario, que se muestra en la Tabla 11, junto con el peso al final del ensayo y el peso una vez se ha secado la muestra.

Mediante estos pesos se van a evaluar los datos de la Tabla 12 mediante los cálculos explicados en el capítulo “7.1 Obtención de resultados” de este documento. Se puede apreciar que la humedad natural real de la muestra ensayada es de 24.93%, por lo que el grado de saturación es de 99.49%.

Masa inicial (g)	174.17
Masa final (g)	162.99
Masa seca final (g)	139.41

Tabla 11: Masas de la muestra totalmente saturada

DATOS DE LA MUESTRA Condiciones Iniciales	
Ho (mm)	76
Vo (mm ³)	86192.74
Area Inicial (mm ²)	1134.11
Peso de Suelo (g)	174.17
Gs (g/cm ³)	2.72
dens nat (g/cm ³)	2.02
W nat %	24.93
Vs (mm ³)	51253.68
Vv (mm ³)	34939.06
Indice de Vacios	0.68
Vw (mm ³)	34760
Sr (%)	99.49

Tabla 12: Datos de condiciones iniciales de la muestra totalmente saturada

En este último caso, también se obtiene un gráfico relacionando la fuerza desviadora (kN) y el desplazamiento vertical (mm) el cual nos muestra todas las etapas realizadas en el ensayo, como puede verse en la Figura 71. En este gráfico se ve que todas las etapas de carga tienen la misma inclinación.

Se han realizado catorce etapas, de las cuales para hacer el cálculo han sido útiles las siete últimas, ya que la primera etapa ha servido para que p' llegue a 200 kPa, y las seis siguientes etapas han servido para calibrar el equipo.

La muestra empieza con un desplazamiento vertical de 0 mm y con una fuerza desviadora muy pequeña aumenta el desplazamiento vertical hasta 10 mm. Una vez se reduce ese desplazamiento y el ensayo empieza a hacer etapas de carga, la muestra llega a tener un desplazamiento vertical máximo de 4.2 mm, y a una fuerza desviadora máxima de 0.183 kN.

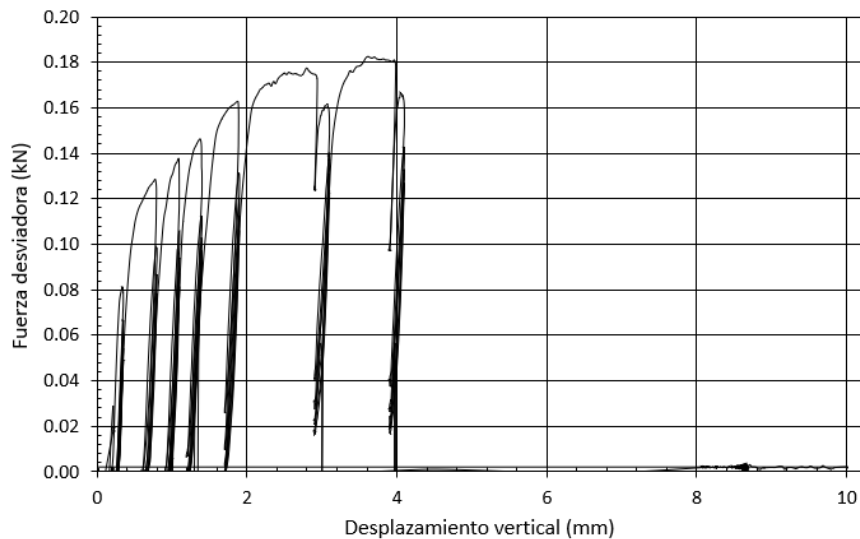


Figura 71: Relación fuerza desviadora-desplazamiento vertical de todas las etapas de una muestra totalmente saturada

Después de ver el gráfico que relaciona el desplazamiento vertical y la fuerza desviadora donde se observan todas las etapas del ensayo, se ha realizado un gráfico que relacione también la fuerza desviadora y el desplazamiento vertical, pero en este caso por cada etapa, para poder ver todos los diferentes ciclos que hay dentro de cada etapa. En la siguiente Figura 72, se presentan los ciclos realizados en la etapa 12 como ejemplo de este ensayo, pero en el capítulo 12 de Anexos de este documento se van a representar todas las demás relaciones del resto de etapas.

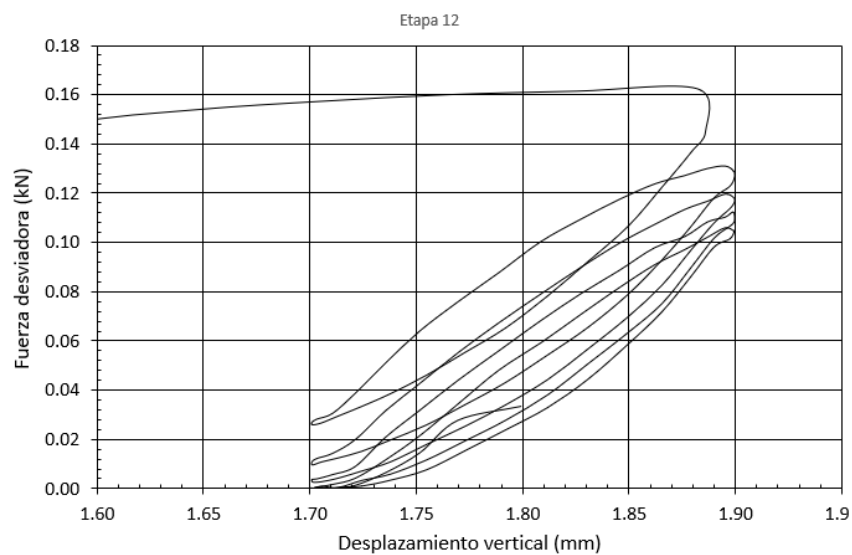


Figura 72: Relación fuerza desviadora- desplazamiento vertical de la etapa 12 de una muestra totalmente saturada

Posteriormente se ha hecho la relación entre el desviador y la deformación de corte de cada uno de los ciclos mencionados, probando cuál de ellos tiene mejor relación y una curva más clara. En la Figura 73 puede verse la curva conseguida de la etapa 12, en la cual puede verse que los extremos no son totalmente limpios cuando menor es la deformación de corte, cosa que puede hacer que más adelante que los cálculos realizados puedan variar un poco.

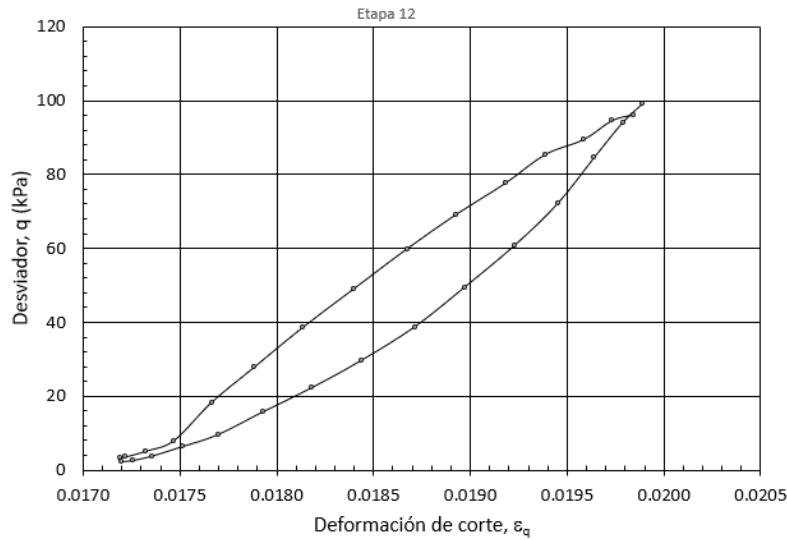


Figura 73: Relación desviador-deformación de corte de un ciclo de la etapa 12 de una muestra totalmente saturada

Una vez escogido el ciclo más adecuado, se muestra la relación entre la deformación de corte y el módulo elástico de corte G (kPa), la cual se realiza a partir del crecimiento de los valores de p' , y pueden verse en ella los resultados obtenidos con los cálculos de la deformación de corte** (equivalente a la línea negra de “medidas”), y a la obtenida mediante los cálculos con la deformación de corte *** (equivalente a la línea roja de “ajuste”). Esto puede verse en la Figura 74.

Pueden observarse unas pequeñas diferencias entre los resultados obtenidos de las medidas realizadas y de los ajustes realizados, pero eso ocurre por las ya nombradas anomalías de la curva de la Figura 73.

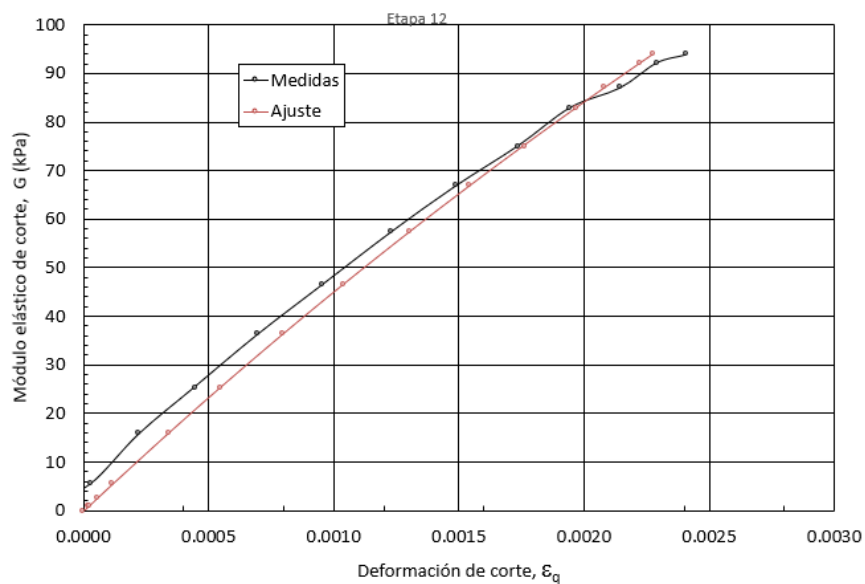


Figura 74: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de un ciclo de la etapa 12 de una muestra totalmente saturada

En la Figura 75 se relacionan el módulo elástico de corte G (kPa) y la deformación de corte, pero, en este caso, la línea negra equivalente a “medidas” se realiza con el módulo de corte G^{**} calculado, y la línea roja equivalente a “ajuste” se obtiene con el módulo de corte G^{***} .

Se ve que hay una diferencia entre las medidas tomadas y el ajuste realizado a la parte izquierda del gráfico, es decir, en caso de deformaciones muy pequeñas, por las anomalías ya mencionadas, por lo que hay que tener en cuenta valores mayores a 0.0015 de deformación de corte, que es el punto donde tanto las medidas como los ajustes realizados son coherentes, para así obtener resultados y valores del factor de amortiguamiento más fiables.

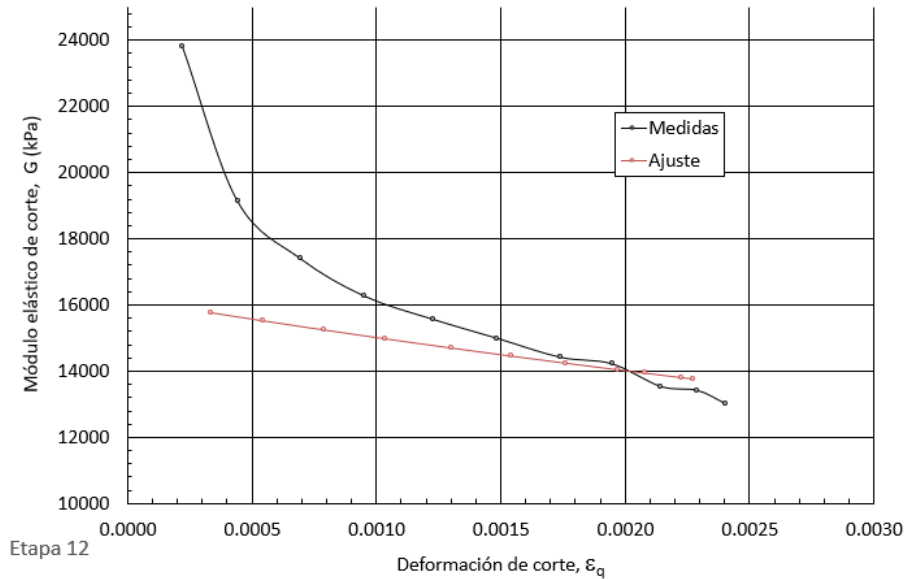


Figura 75: Relación de módulo de corte G^{**} y módulo de corte G^{***} - deformación de corte de un ciclo de la etapa 12 de una muestra totalmente saturada

La siguiente Figura 76 es la relación entre la deformación de corte en escala logarítmica y el módulo elástico de corte G (kPa). En este gráfico aparecen tanto de los resultados obtenidos con el equipo triaxial como los valores obtenidos para una muestra con las mismas características que la ensayada en el equipo triaxial, pero ensayada en el equipo de columna resonante (Canseco, 2019).

Al ser el caso de una muestra completamente saturada, los resultados son más variados, y puede verse que, en este caso, los resultados obtenidos en el equipo de columna resonante, son para casos de una deformación de corte mayor que en los casos de las muestras anteriores. De todos modos, se puede observar que tanto las medidas como ajustes realizados en el caso de la muestra ensayada en el equipo triaxial, como la ensayada en el equipo de columna resonante llevan la misma dirección, donde a medida que la deformación de corte aumenta, el módulo elástico de corte G (kPa) disminuye.

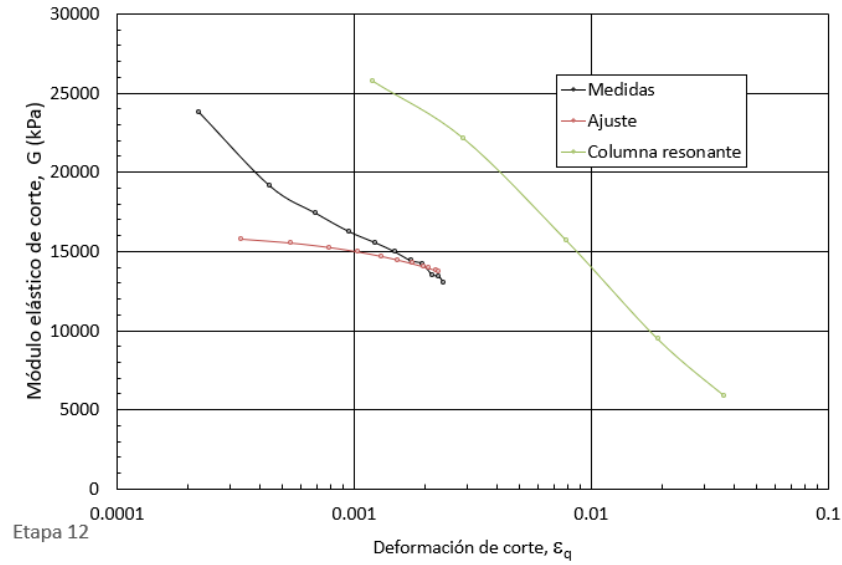


Figura 76: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de un ciclo de una etapa 12 de una muestra totalmente saturada, y comparación con muestra ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019)

Para terminar, se muestran en la siguiente Figura 77 los valores obtenidos de la deformación de corte y del factor de amortiguamiento D tanto en el equipo triaxial como en el equipo de columna resonante. Como ya se ha mencionado anteriormente, en este caso de que la muestra está saturada ocurre una anomalía con los datos de la muestra ensayada en el equipo de columna resonante, ya que tiene un rango de valores de deformación de corte mayor al habitual, con lo que puede verse que, en este caso, aún y siendo muestras similares ensayadas en ambos equipos, los resultados obtenidos no concuerdan entre ellos.

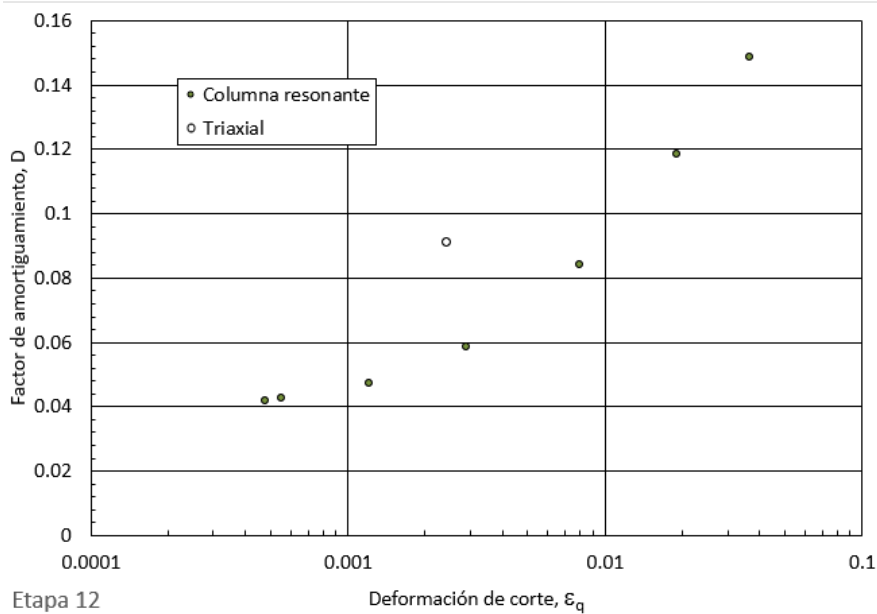


Figura 77: Relación factor de amortiguamiento-deformación de corte de una muestra totalmente saturada ensayada en triaxial y en columna resonante (Canseco, 2019)

8. Análisis de resultados

En este capítulo se va a resumir los resultados obtenidos en todas las etapas, para poder hacer así un análisis de todos ellos. Se muestran unas tablas en las que se ven todas las etapas realizadas de cada muestra, con la deformación de corte y el factor amortiguamiento de cada una de ellas. Posteriormente se compararán con los resultados obtenidos mediante la columna resonante (Canseco, 2019).

Muestra 1

En el gráfico de la Figura 78 puede verse que hay diferencia entre las medidas tomadas y el ajuste realizado en cuanto a cada una de las etapas se refiere, sobre todo en los casos en los que la deformación de corte es más pequeña. Además, se puede apreciar que a medida que se han ido realizando etapas en el ensayo, el módulo elástico de corte G (kPa) ha ido disminuyendo a medida que el desplazamiento vertical aumentaba, es decir, a medida que las etapas se iban realizando.

Cuanto mayor es la deformación de corte, mayor es la concentración de valores del módulo elástico de corte G (kPa). Se puede observar que son valores bastante constantes, pero que tienden a disminuir a medida que la deformación de corte aumenta, pero no disminuye tanto como en el caso de otras muestras con otras unidades, como se puede ver en los siguientes apartados de este informe.

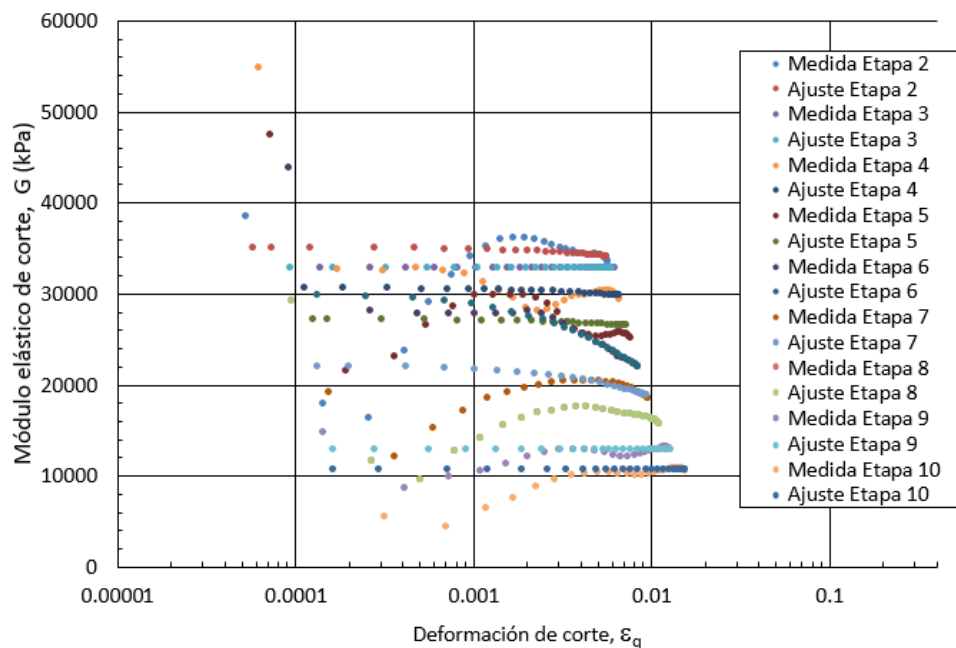


Figura 78: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de todas las medidas y ajustes realizados de todas las etapas de una muestra de 5% de humedad

En la siguiente Figura 79 puede verse un gráfico que relaciona el módulo elástico de corte G (kPa) y la deformación de corte en escala logarítmica tanto de los resultados obtenidos en todas

las etapas del ensayo realizado en el equipo triaxial como en el equipo de columna resonante, obtenidos de Canseco (2019).

Hay que tener en cuenta que el equipo de columna resonante trabaja con un rango de menores dimensiones de la deformación de corte y que el equipo triaxial trabaja con un rango mayor. Se puede apreciar tanto los resultados de todas las etapas del ensayo del equipo triaxial como los resultados del ensayo realizado en columna resonante, que tienen la misma tendencia: el módulo elástico de corte G (kPa) disminuye a medida que la deformación de corte aumenta. Ya que equipo triaxial toma medidas más fiables para valores de deformación de corte mayores, se han tenido en cuenta los datos a partir del valor de 0.003 de deformación de corte.

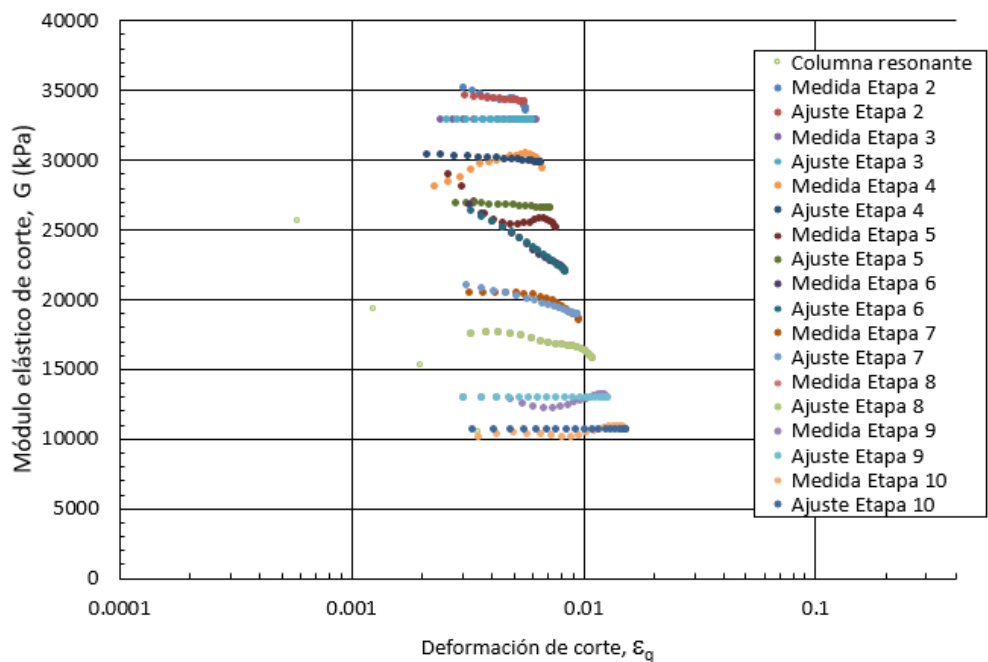


Figura 79: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de todas las medidas y ajustes realizados de todas las etapas de una muestra de 5% de humedad comparado con una muestra igual ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019)

A continuación, en la Tabla 13, se pueden ver todas las etapas válidas del ensayo, con la deformación de corte y factor de amortiguamiento respectivos.

Etap	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Deformación de corte (ϵ_q)	0.0056	0.0062	0.0066	0.0075	0.0083	0.0095	0.0109	0.0125	0.0152
Factor de amortiguamiento	0.119193	0.128363	0.131683	0.140613	0.143382	0.123124	0.138633	0.114378	0.126305

Tabla 13: Valores de deformación de corte y factor de amortiguamiento de todas las etapas de una muestra de 5% de humedad

La siguiente Figura 80, muestra la relación entre la deformación de corte y el factor de amortiguamiento D , definiendo cada etapa del ensayo realizada, y comparándolo además con los resultados obtenidos en el equipo de columna resonante. Se puede observar que a medida

que aumenta la deformación de corte, el factor de amortiguamiento aumenta. Además, se aprecia que los ensayos de la misma muestra realizados en los dos equipos tienden a llevar la misma dirección, dejando de lado alguna posible anomalía.

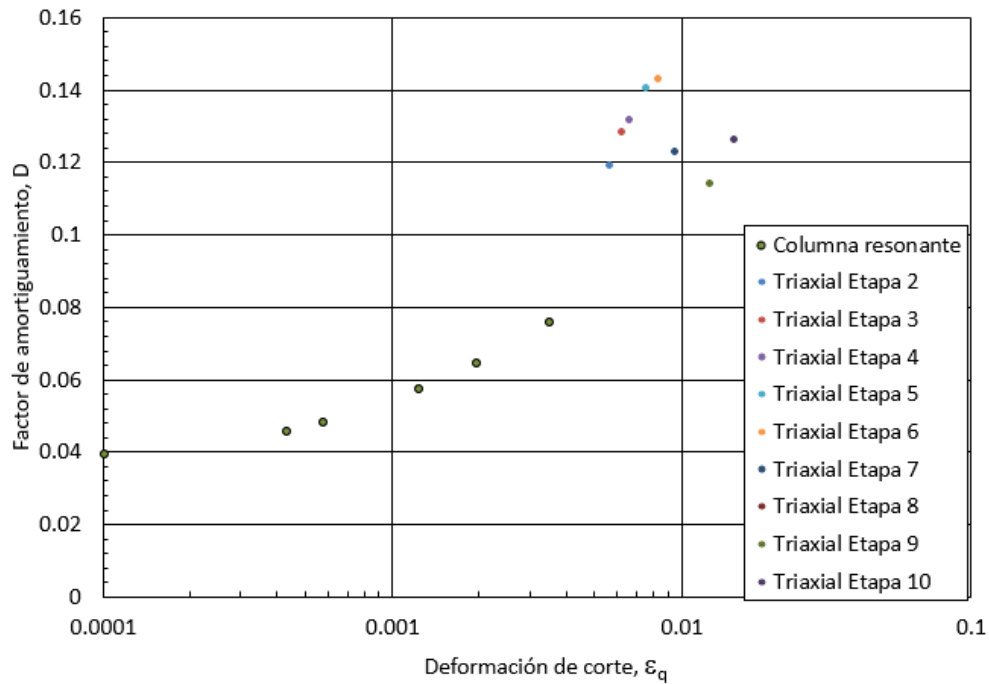


Figura 80: Relación factor de amortiguamiento-deformación de corte de todas las etapas de una muestra de 5% de humedad comparado con una muestra igual ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019)

En la Figura 81 se puede ver la relación entre el acortamiento acumulado de la muestra durante todo el ensayo con el módulo elástico de corte G (kPa). Se puede observar que éste último va disminuyendo a medida que el ensayo se va llevando a cabo, es decir, a medida que aumenta.

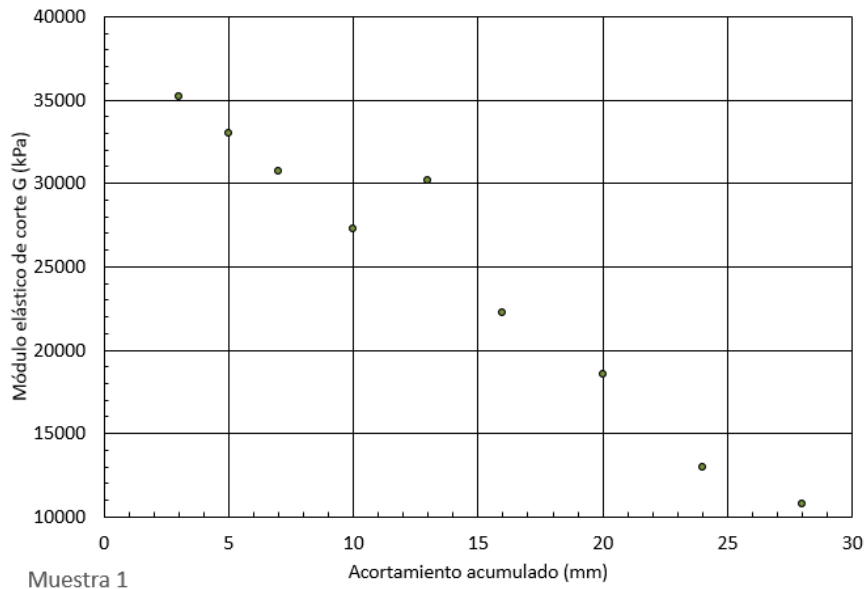


Figura 81: Relación módulo elástico de corte-acortamiento acumulado para una muestra de 5% de humedad

Muestra 2

En la Figura 82 se puede observar la relación que hay entre la deformación de corte y el módulo elástico de corte de una muestra con un 10% de humedad, la cual tiene un 40.95% de grado de saturación. Se observa que cuanto menos es el valor de deformación de corte, más variados son los resultados obtenidos del módulo elástico de corte, y a su vez, se aprecia que tanto las medidas realizadas como los ajustes realizados, a partir de un valor de $1.E-03$ tienden todos a llevar la misma dirección, haciendo que el valor del módulo elástico de corte G (kPa) disminuya a medida que la deformación de corte va aumentando.

Además, se observa que a medida que se han ido realizando etapas en el ensayo, en cada etapa el módulo elástico de corte G (kPa) ha ido disminuyendo, es decir, que ha ido disminuyendo a medida que el desplazamiento vertical aumentaba.

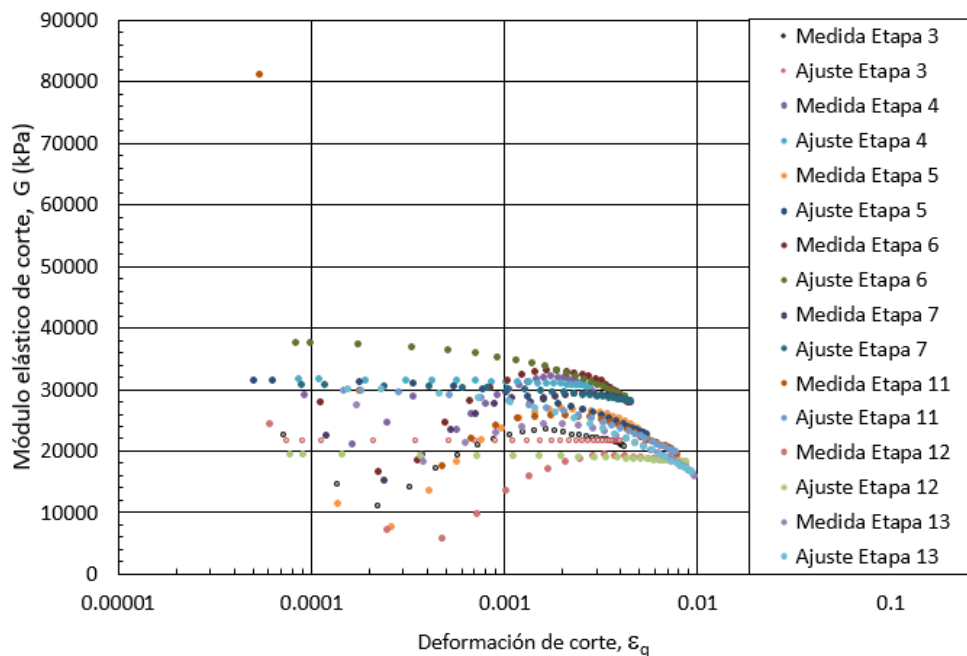


Figura 82: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de todas las medidas y ajustes realizados de todas las etapas de una muestra de 10% de humedad

En la Figura 83 puede verse la relación entre la deformación de corte en escala logarítmica y el módulo elástico de corte G (kPa). Además, se relacionan también los datos obtenidos en el equipo de columna resonante (Canseco, 2019), para poder compararlos con los resultados obtenidos en todas las etapas del ensayo realizado en el equipo triaxial.

Se han tenido en cuenta los valores mayores a 0.001 para los resultados de todas las etapas del ensayo realizado en el equipo triaxial, tanto las medidas como los ajustes. Se observa que en todos los casos el módulo elástico de corte G (kPa) disminuye a medida que la deformación de corte (mm) aumenta. Además, tener en cuenta que el equipo de columna resonante trabaja con un rango de menores dimensiones de la deformación de corte que el equipo triaxial, donde

puede verse que tanto los resultados de todas las etapas del ensayo del equipo triaxial como los resultados del ensayo realizado en columna resonante tienden a llevar la misma tendencia.

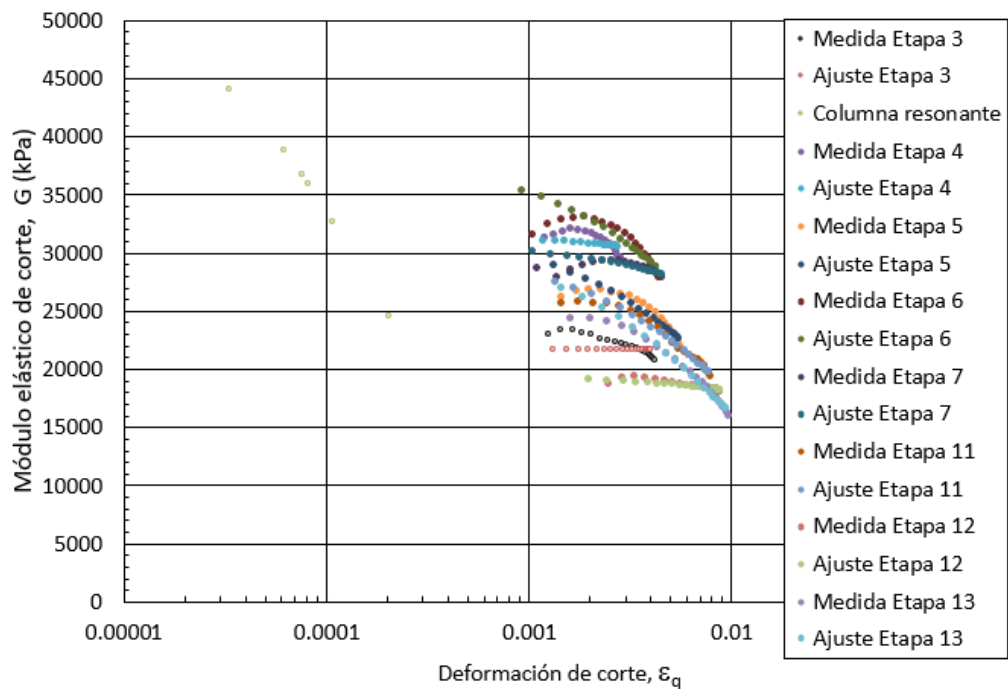


Figura 83: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de todas las medidas y ajustes realizados de todas las etapas de una muestra de 10% de humedad comparado con una muestra igual ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019)

A continuación, se muestra una Tabla 14 en la que se pueden ver todas las etapas válidas del ensayo, con la deformación de corte y factor de amortiguamiento respectivos.

Etapa	3	4	5	6	7	11	12	13
Deformación de corte (ϵ_q)	0.0042	0.0028	0.0057	0.0043	0.0045	0.0078	0.0087	0.0096
Factor de amortiguamiento	0.11534	0.083495	0.142617	0.101083	0.076738	0.156489	0.117703	0.15938

Tabla 14: Valores de deformación de corte y factor de amortiguamiento de todas las etapas de una muestra de 10% de humedad

La Figura 84 muestra la relación entre la etapa del ensayo, la deformación de corte y el factor de amortiguamiento D, y además lo compara con los resultados obtenidos en el equipo de columna resonante. Se puede apreciar, que a medida que aumenta la deformación de corte, el factor de amortiguamiento también aumenta. Además, se aprecia que los resultados obtenidos en ambos ensayos tienden la misma tendencia.

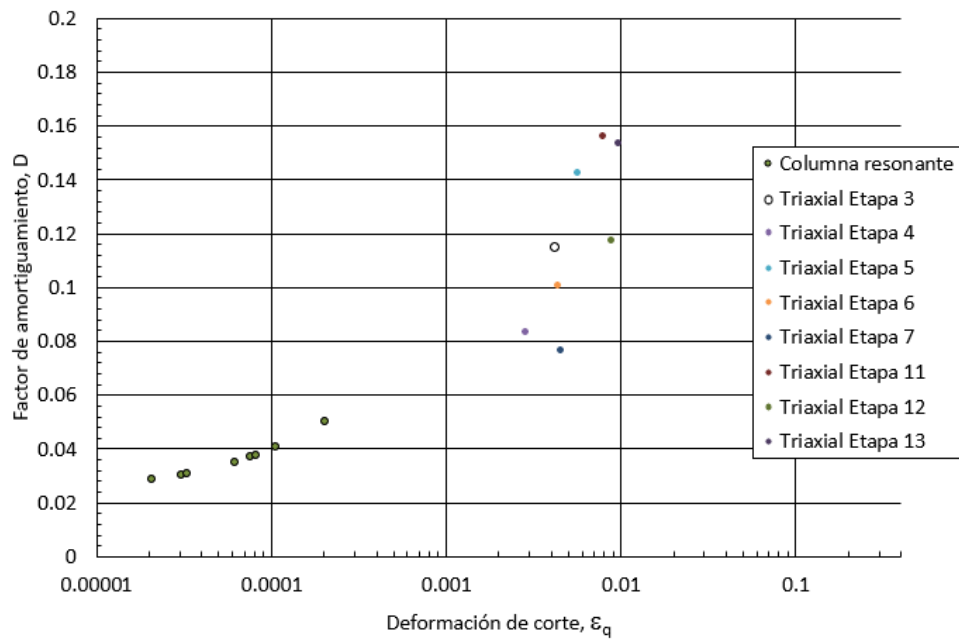


Figura 84: Relación factor de amortiguamiento-deformación de corte de todas las etapas de una muestra de 10% de humedad comparado con una muestra igual ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019)

En la siguiente Figura 85 se puede ver la relación entre el acortamiento acumulado de la muestra durante todo el ensayo con el módulo elástico de corte G (kPa). Se puede observar que, quitando tres puntos de anomalías, el módulo elástico de corte G (kPa) va disminuyendo a medida que el acortamiento acumulado aumenta.

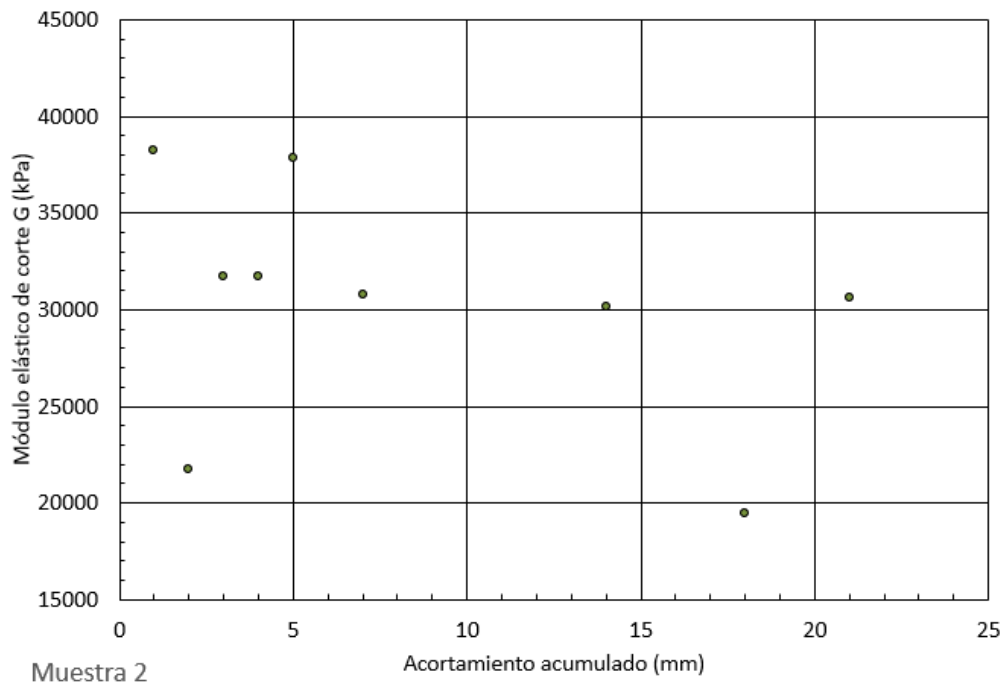


Figura 85: Relación módulo elástico de corte-acortamiento acumulado para una muestra de 10% de humedad

Muestra 3

En la Figura 86, se observa que hay una diferencia entre las medidas tomadas y el ajuste realizado en todas las etapas, y este desajuste es mucho mayor cuando la deformación de corte es más pequeña, como puede verse en los datos obtenidos en las medias de las etapas 5 y 6. Las demás etapas, y sobre todo, a partir de que la deformación de corte es mayor a $1.E-03$, tanto los datos medidos como los ajustes realizados tienen la misma trayectoria y se ve que todos llevan la misma tendencia, donde se ve que a medida que la deformación de corte aumenta, el módulo elástico de corte $G(kPa)$ va disminuyendo.

Además, cabe decir que a medida que se han ido realizando etapas en el ensayo, el módulo elástico de corte G (kPa) obtenido en cada etapa ha ido disminuyendo, esto es, que ha ido disminuyendo a medida que el desplazamiento vertical iba aumentando.

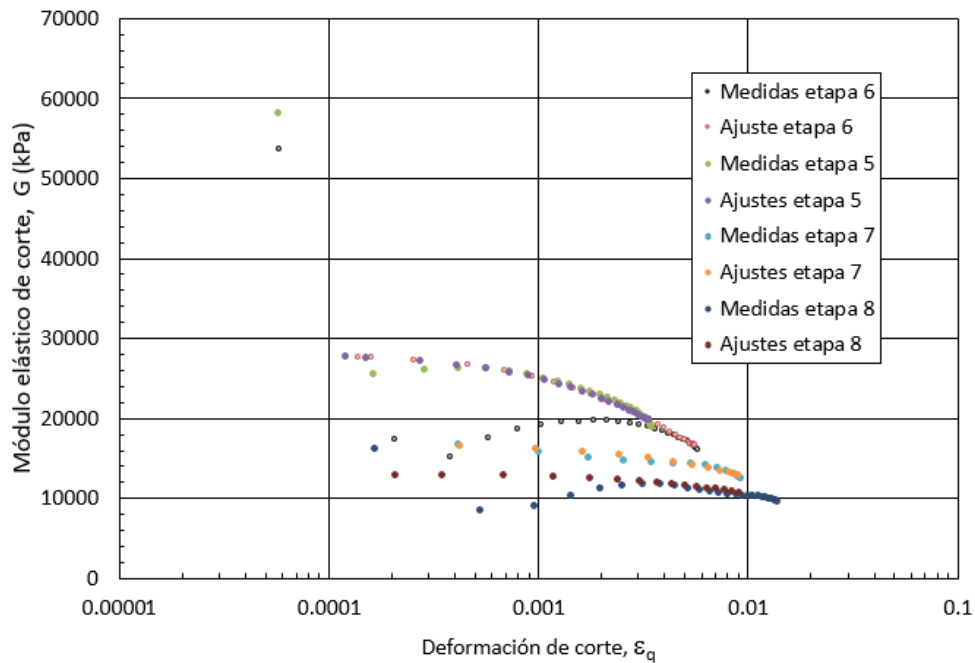


Figura 86: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de todas las medidas y ajustes realizados de todas las etapas de una muestra de 15% de humedad

En la Figura 87, se ve la misma relación que en el gráfico anterior, pero esta vez pudiendo compararlo con los resultados de la columna resonante también (Canseco, 2019). Puede observarse que, dejando aparte las anomalías comentadas anteriormente de cuando la deformación de corte es muy pequeña, los resultados obtenidos con la columna resonante llevan la misma trayectoria que los resultados obtenidos con el equipo triaxial. Se observa que en cuanto aumenta la deformación de corte, al igual que en el caso de la muestra ensayada en el equipo triaxial, disminuye el módulo elástico de corte $G(kPa)$.

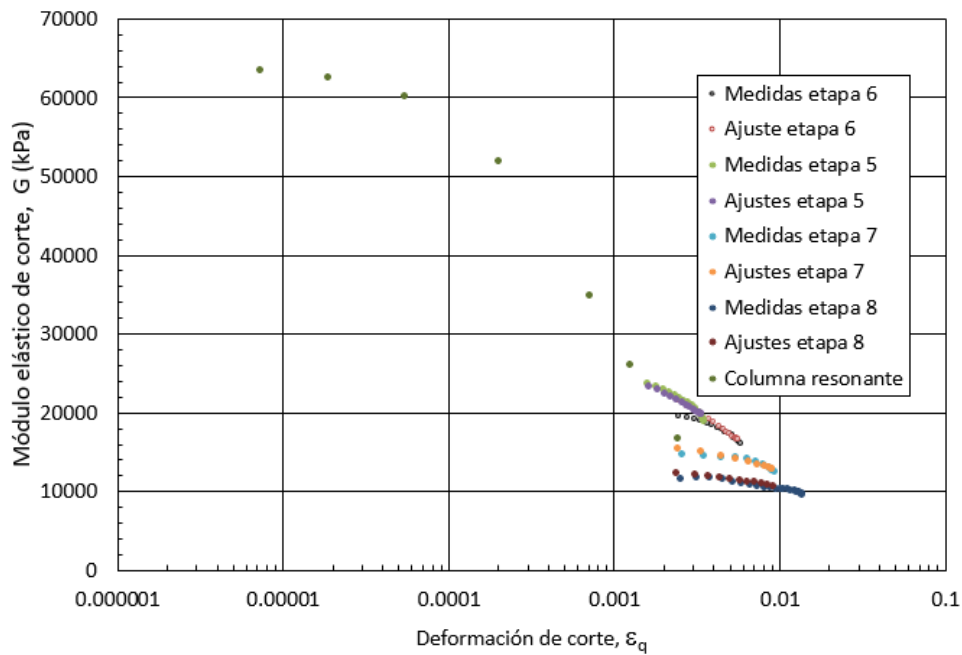


Figura 87: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de todas las medidas y ajustes realizados de todas las etapas de una muestra de 15% de humedad comparado con una muestra igual ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019)

A continuación, se muestra la Tabla 15 en la que se pueden ver todas las etapas válidas del ensayo, con la deformación de corte y factor de amortiguamiento respectivos. Se puede apreciar, que a medida que la deformación de corte aumenta, el factor de amortiguamiento aumenta también.

Etapa	4	5	6	7	8
Deformación de corte (ϵ_q)	0.0028	0.0035	0.0058	0.0092	0.0137
Factor de amortiguamiento (D)	0.0723196	0.105098	0.1182001	0.1634195	0.1738155

Tabla 15: Valores de deformación de corte y factor de amortiguamiento de todas las etapas de una muestra de 15% de humedad

La Figura 88 muestra la relación mencionada previamente entre la etapa del ensayo, la deformación de corte y el factor de amortiguamiento D , comparándolo además con los resultados obtenidos en el equipo de columna resonante. Se puede apreciar, que a medida que aumenta la deformación de corte, el factor de amortiguamiento va aumentando. Además, se aprecia que los ensayos de la misma muestra realizados en ambos equipos llevan la misma tendencia.

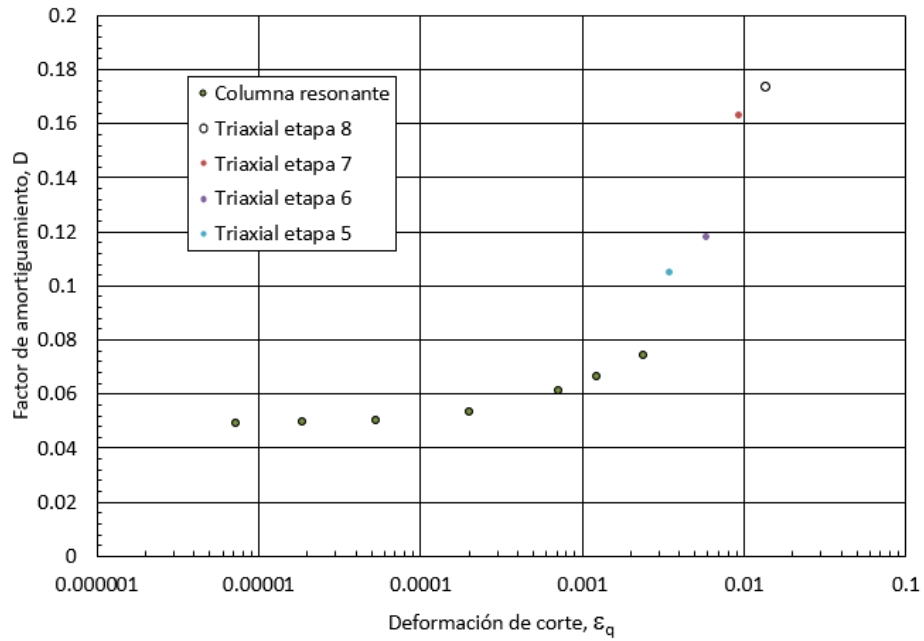


Figura 88: Relación factor de amortiguamiento-deformación de corte de todas las etapas de una muestra de 15% de humedad comparado con una muestra igual ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019)

Por lo que, se puede decir que a medida que la deformación de corte aumenta, el módulo elástico de corte de un suelo va a disminuir, pero a la vez, su factor de amortiguamiento va a aumentar.

En la Figura 89 se puede ver la relación entre el acortamiento acumulado de la muestra durante todo el ensayo con el módulo elástico de corte G (kPa). Se puede apreciar que, quitando la excepción del primer caso, a medida que la deformación va aumentando, es decir a medida que transcurre la realización del ensayo, disminuye el módulo elástico de corte G (kPa).

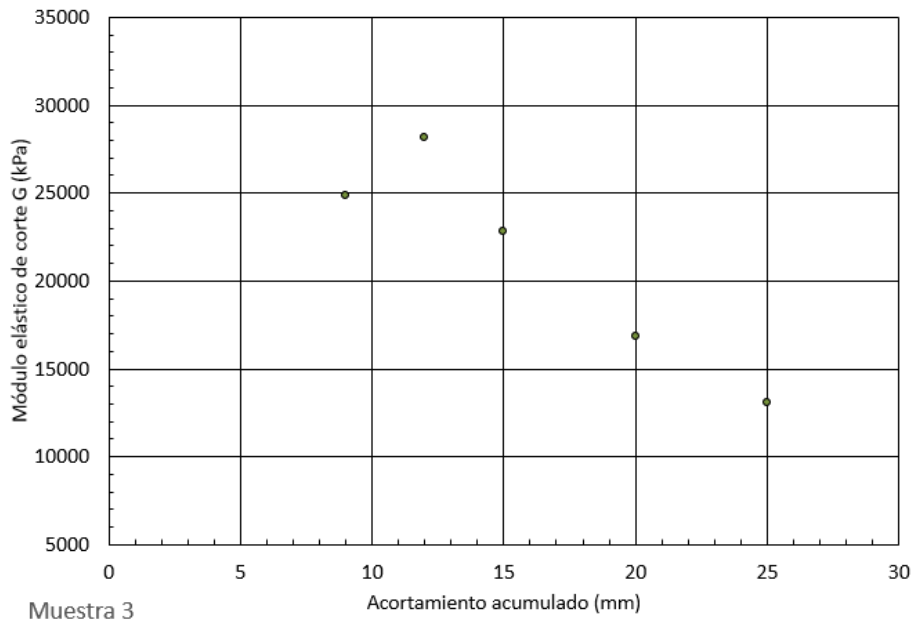


Figura 89: Relación módulo elástico de corte-acortamiento acumulado para una muestra de 15% de humedad

Muestra 4

En la Figura 90 se puede observar que a medida que se han ido realizando etapas en el ensayo, el módulo elástico de corte G (kPa) obtenido en cada una de ellas ha ido disminuyendo, es decir, que ha ido disminuyendo a medida que el desplazamiento vertical aumentaba.

Cuanto menor es la deformación de corte, mayor disparidad hay en los resultados, por lo que es mejor tener en cuenta los valores obtenidos a partir de un valor de $1.E-03$ de la deformación de corte, viendo que los resultados a partir de ese punto son más parecidos y fiables. Se observa que a medida que aumenta la deformación de corte, el módulo elástico de corte G (kPa) disminuye, y además que, en los casos de todas las etapas, tanto las medidas como los ajustes realizados siguen la misma tendencia.

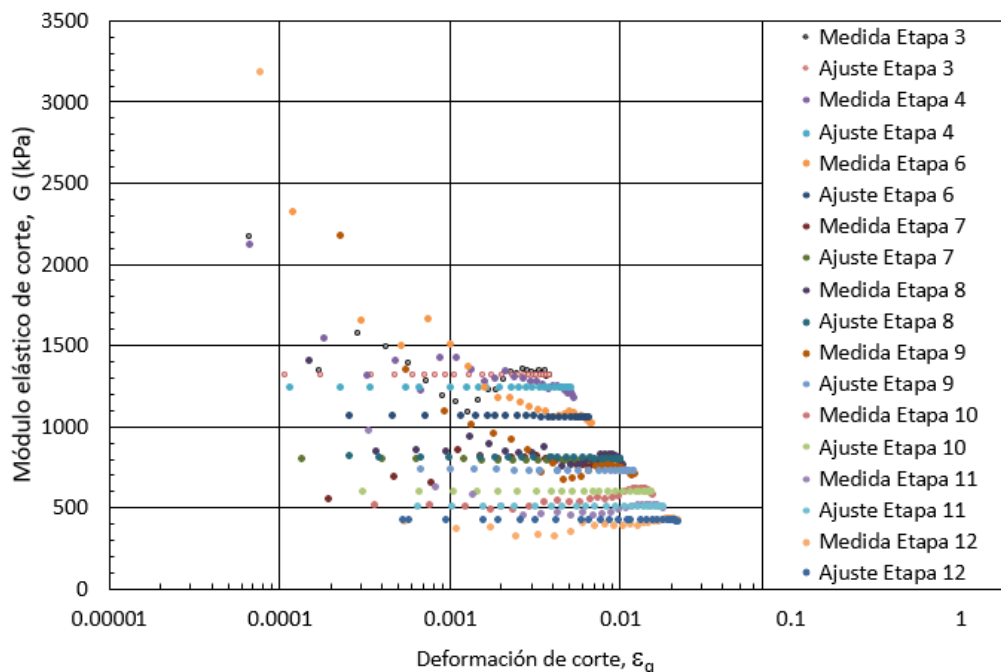


Figura 90: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de todas las medidas y ajustes realizados de todas las etapas de una muestra de 20% de humedad

En la Figura 91 puede verse la misma relación que en el gráfico anterior, pero esta vez relacionada con los datos obtenidos en el equipo de columna resonante, para así poder compararlos con los resultados obtenidos en todas las etapas del ensayo realizado en el equipo triaxial.

Se puede observar que cuanto mayor es el grado de saturación, el equipo de columna resonante trabaja con mayores deformaciones de corte. En este caso, puede observarse que los resultados de todas las etapas del ensayo realizado en el equipo triaxial, el módulo elástico de corte G (kPa) disminuye a medida que la deformación de corte aumenta. Además, puede verse que tanto los resultados de todas las etapas del ensayo del equipo triaxial como los resultados del ensayo realizado en columna resonante obtenidos de Canseco (2019), siguen la misma tendencia.

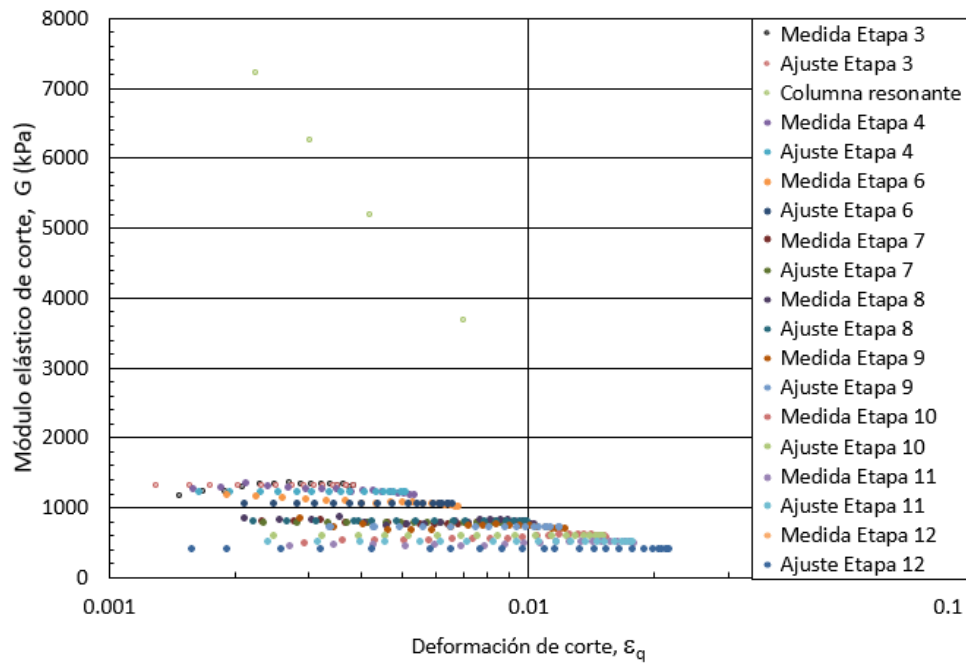


Figura 91: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de todas las medidas y ajustes realizados de todas las etapas de una muestra de 20% de humedad comparado con una muestra igual ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019)

A continuación, se muestra la Tabla 16 en la que se pueden ver todas las etapas válidas del ensayo, con la deformación de corte y factor de amortiguamiento respectivos.

Etapa	3	4	6	7	8	9	10	11	12
Deformación de corte (ϵ_q)	0.0038	0.0053	0.0068	0.0088	0.0103	0.0122	0.0153	0.0179	0.0215
Factor de amortiguamiento	0.13452	0.141292	0.140315	0.13287	0.167157	0.171248	0.172756	0.16961	0.167231

Tabla 16: Valores de deformación de corte y factor de amortiguamiento de todas las etapas de una muestra de 20% de humedad

La Figura 92 muestra la relación entre el factor de amortiguamiento D y la deformación de corte, especificando cada etapa realizada en el ensayo del equipo triaxial, y lo compara con los resultados obtenidos en el equipo de columna resonante.

Se puede apreciar, que a medida que aumenta la deformación de corte, el factor de amortiguamiento también aumenta. Además, se aprecia que los resultados de ambos ensayos tienen la misma tendencia, pero, como ya se ha mencionado anteriormente, cuanto mayor es el grado de saturación mayores anomalías hay entre unos equipos y otros.

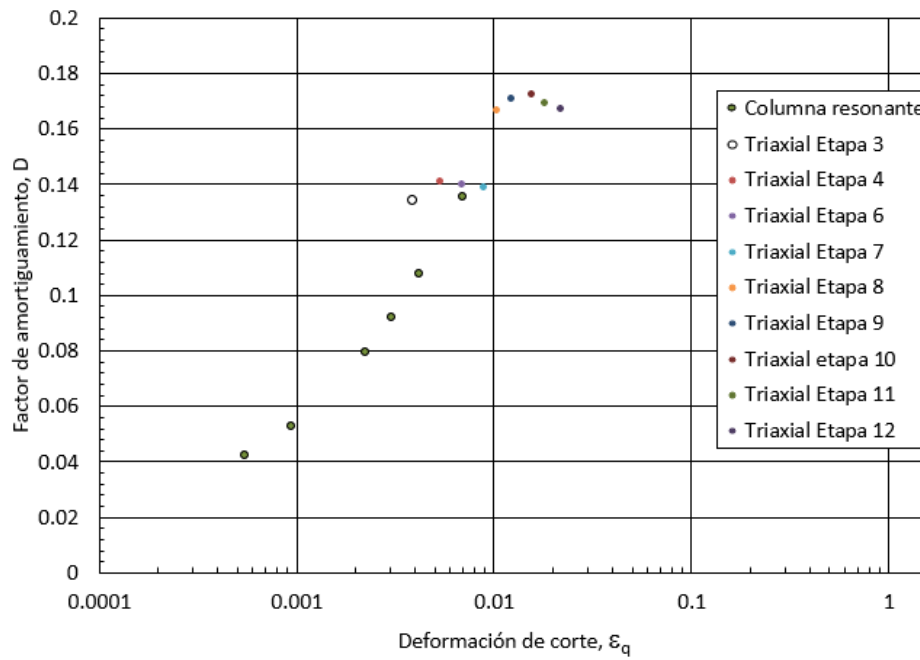


Figura 92: Relación factor de amortiguamiento-deformación de corte de todas las etapas de una muestra de 20% de humedad comparado con una muestra igual ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019)

En la Figura 93 se puede ver la relación entre el acortamiento acumulado de la muestra durante todo el ensayo con el módulo elástico de corte G (kPa). Se observa que a medida que la deformación va aumentando disminuye el módulo elástico de corte G (kPa).

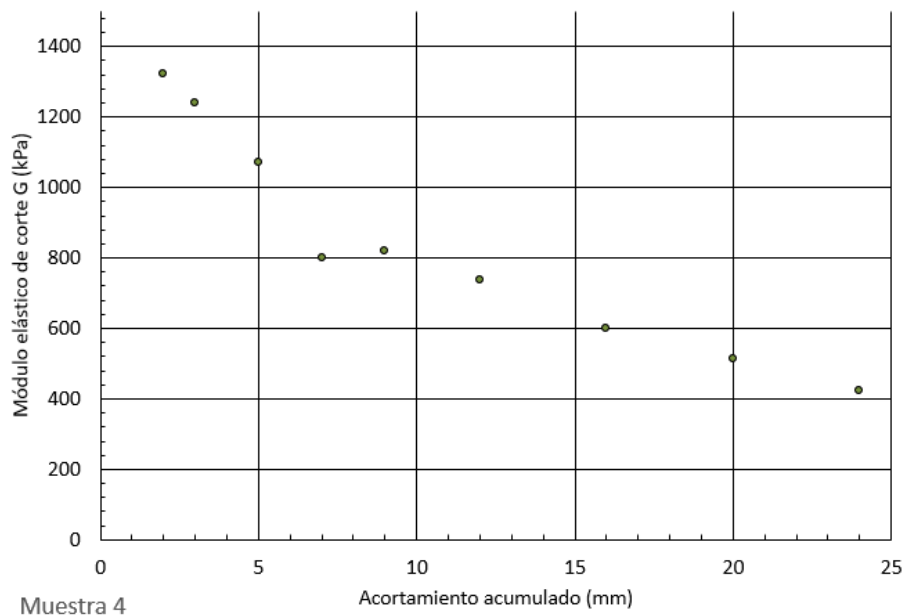


Figura 93: Relación módulo elástico de corte-acortamiento acumulado para una muestra de 20% de humedad

Muestra 5

Este caso del ensayo con la muestra saturada es el caso más complejo, y en el que se han obtenido resultados más diferentes al resto de los ensayos. Puede verse en la Figura 94, que, en algunas etapas, las medidas realizadas comienzan con un valor bajo del módulo elástico de corte G (kPa), y va aumentando a medida que la deformación de corte va aumentando, hasta llegar a un valor concreto de la deformación de corte y vuelve a tender a disminuir de nuevo, al igual que las medidas y ajustes del resto de las etapas. En general, el módulo elástico de corte G (kPa) disminuye a medida que aumenta la deformación de corte, a excepción de tres casos particulares.

También se observa que, todas las etapas tienden a tener la misma tendencia, a excepción de los tres casos mencionados.

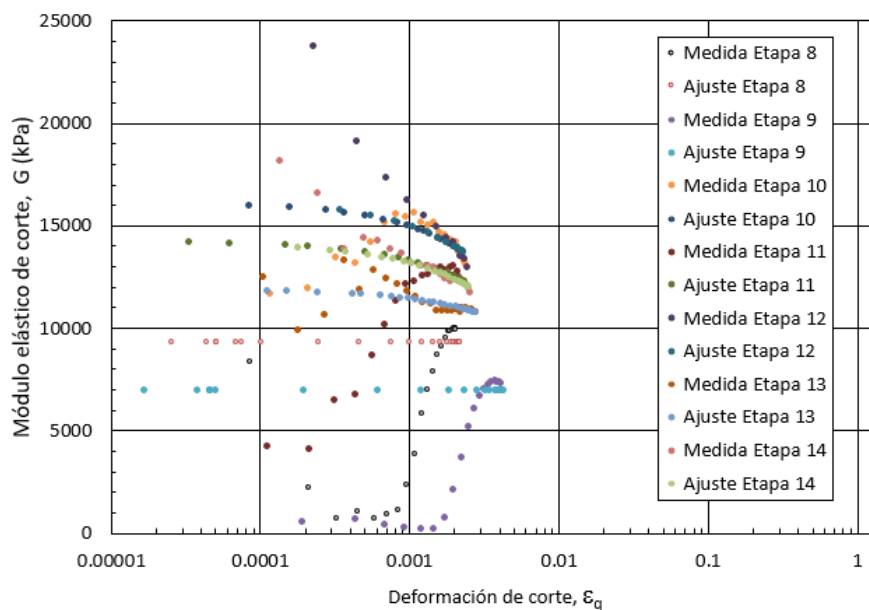


Figura 94: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de todas las medidas y ajustes realizados de todas las etapas de una muestra totalmente saturada

En la Figura 95 puede verse la relación entre la deformación de corte en función logarítmica y el módulo elástico de corte G (kPa) igual que en el gráfico anterior, solo que en este caso se relacionan también los datos obtenidos en el equipo de columna resonante obtenidos de Canseco (2019).

En cuanto a los datos de medidas y ajustes de las etapas el equipo triaxial, hay que decir que se han tenido en cuenta valores de deformación de corte mayores a 0.001, ya que los resultados obtenidos para valores más pequeños tenían anomalías mencionadas anteriormente. De todas formas, se puede observar que a medida que la deformación de corte aumenta, el módulo elástico de corte G (kPa) disminuye. Además, tanto los casos de las etapas de la muestra ensayada en el equipo triaxial como la muestra ensayada en el equipo de columna resonante tienen la misma tendencia.

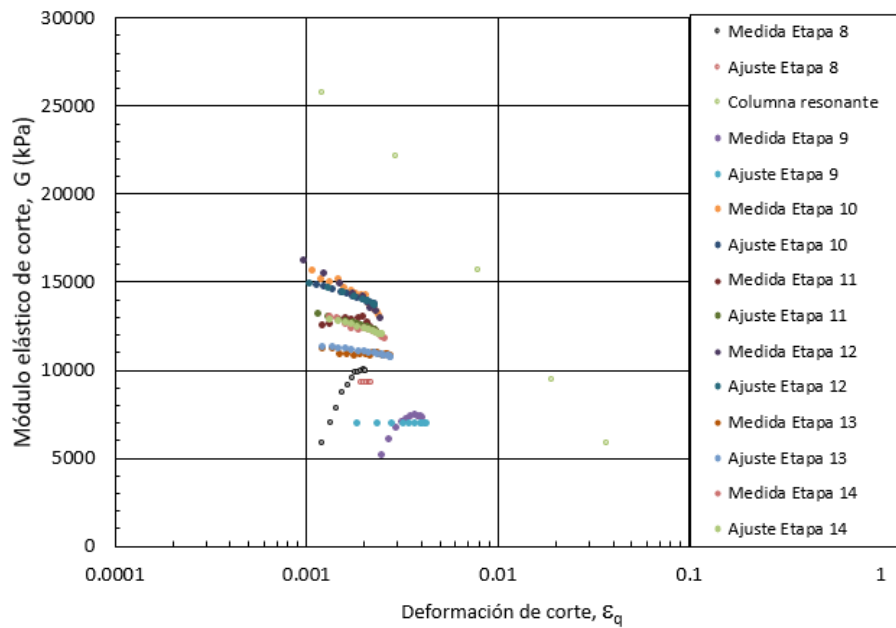


Figura 95: Relación módulo elástico de corte-deformación de corte de todas las medidas y ajustes realizados de todas las etapas de una muestra totalmente saturada, comparado con una muestra igual ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019)

A continuación, se muestra la Tabla 17 en la que se pueden ver todas las etapas válidas del ensayo, con la deformación de corte y factor de amortiguamiento respectivos.

Etapa	8	9	10	11	12	13	14
Deformación de corte (ϵ_q)	0.0022	0.004	0.0024	0.0023	0.0024	0.0027	0.0026
Factor de amortiguamiento	0.055154	0.092717	0.109535	0.093001	0.092024	0.122262	0.092029

Tabla 17: Valores de deformación de corte y factor de amortiguamiento de todas las etapas de una muestra totalmente saturada

La siguiente Figura 96 muestra la relación entre los resultados de todas las etapas del ensayo del equipo triaxial del factor de amortiguamiento D y la deformación de corte, y se compara con los resultados obtenidos en el equipo de columna resonante.

Se puede apreciar, que a medida que aumenta la deformación de corte, el factor de amortiguamiento también aumenta. Además, se aprecia que los resultados de ambos ensayos tienen la misma tendencia, pero, como ya se ha mencionado anteriormente, cuanto mayor es el grado de saturación mayores diferencias hay entre los resultados de un equipo y otro.

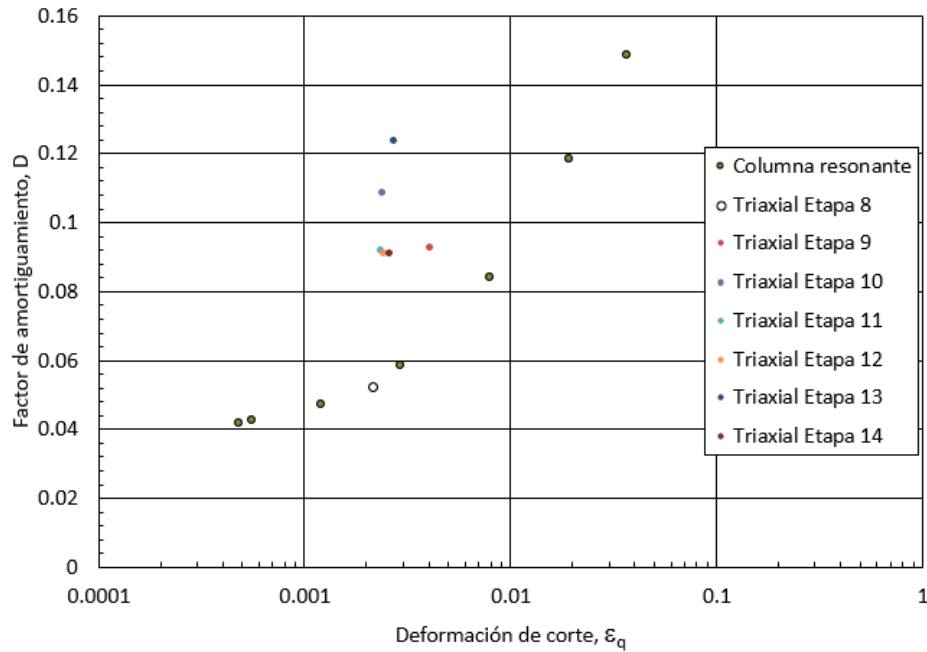


Figura 96: Relación factor de amortiguamiento-deformación de corte de todas las etapas de una muestra totalmente saturada, comparada con una muestra igual ensayada en equipo de columna resonante (Canseco, 2019)

En la Figura 97 se puede ver la relación entre el módulo elástico de corte G (kPa) y la deformación acumulada de la muestra durante todo el ensayo. Como ya se ha mencionado anteriormente en el presente documento, el caso del ensayo de la muestra saturada es un caso más complicado, en el que se han obtenido resultados más diversos al resto. De todos modos, se puede apreciar que el módulo elástico de corte G (kPa) tiende a disminuir a medida que avanza el ensayo, es decir a medida que aumenta la deformación, viendo también las anomalías que hay en los resultados.

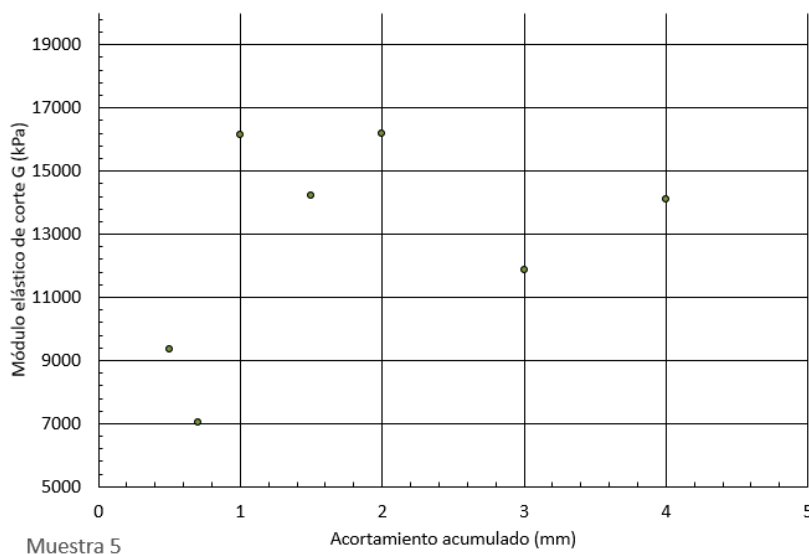


Figura 97: Relación módulo elástico de corte-deformación acumulada para una muestra totalmente saturada

9. Conclusiones

El objetivo de este trabajo de fin de máster era incrementar el conocimiento acerca del comportamiento del suelo de la arcilla limosa de la ciudad de Barcelona, analizando los parámetros dinámicos del suelo para una densidad seca en concreto. Este análisis se ha realizado para deformaciones pequeñas, en un rango aproximado de 0.00001 y 0.1, bajo carga cíclica, a humedad constante, realizado mediante un equipo triaxial.

Una de las cosas a concluir de este ensayo es que, el módulo de corte disminuye a medida que la deformación de corte aumenta. Además, a medida que crece el grado de saturación, el módulo de corte disminuye, con la excepción del caso de una muestra totalmente saturada.

La Figura 98 compara los dos parámetros estudiados en este trabajo en un solo gráfico: Módulo de corte (referido al módulo de corte máximo a muy pequeñas deformaciones) respecto a factor de amortiguamiento. Como puede verse en dicha Figura, a medida que el factor de amortiguamiento aumenta, el módulo de corte varía, dependiendo del grado de saturación de la muestra. Las muestras con grado de saturación bajo, a medida que el factor de amortiguamiento aumenta, la relación entre el módulo de corte de ese punto y el módulo de corte inicial disminuye. En cambio, las tres muestras con mayor grado de saturación, la mencionada relación se mantiene constante.

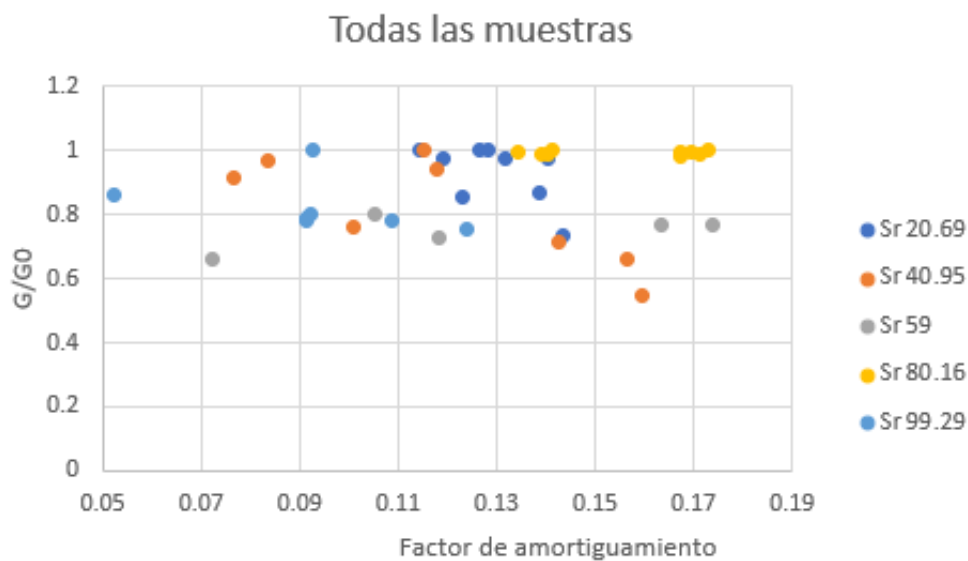


Figura 98: Relación módulo de corte-factor de amortiguamiento de todas las muestras en base a su grado de saturación

La Figura 99, es un gráfico que relaciona el módulo elástico de corte G (kPa) con el grado de saturación, dependiendo de los diferentes niveles de la deformación de corte, la cual muestra que el módulo elástico de corte disminuye a medida que el grado de saturación aumenta, con la excepción del ensayo realizado con la muestra totalmente saturada. Además, para los casos individuales de cada uno de los grados de saturación, a medida que la deformación de corte es mayor, menor es el módulo de corte.

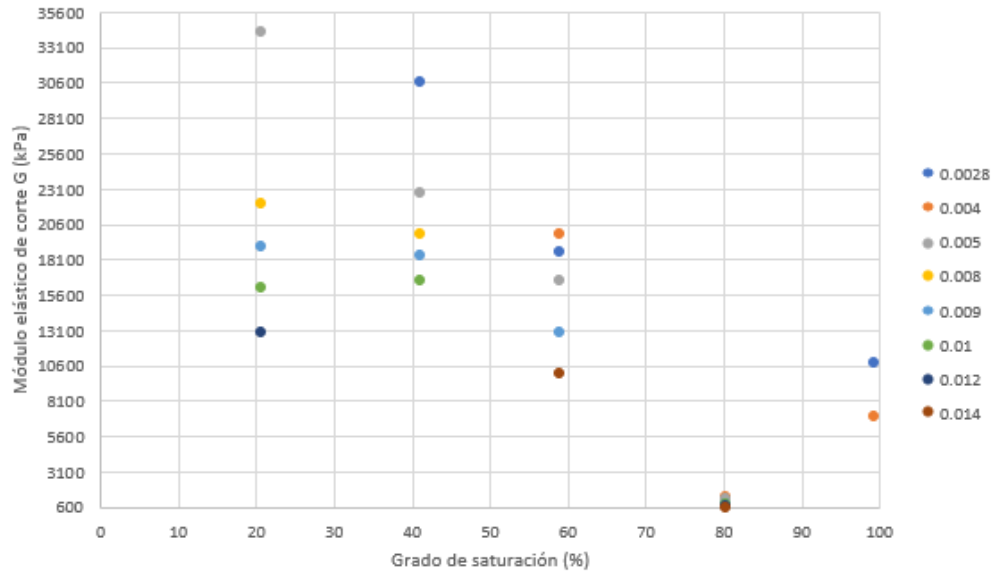


Figura 99: Relación módulo elástico de corte-grado de saturación, dependiendo de los diferentes niveles de la deformación de corte

Para observar mejor la tendencia de disminución del módulo de corte G(kPa) a medida que aumenta el grado de saturación, se muestra la Figura 100, que muestra la relación del módulo elástico de corte G (kPa) con el grado de saturación para el caso de menor deformación de corte.

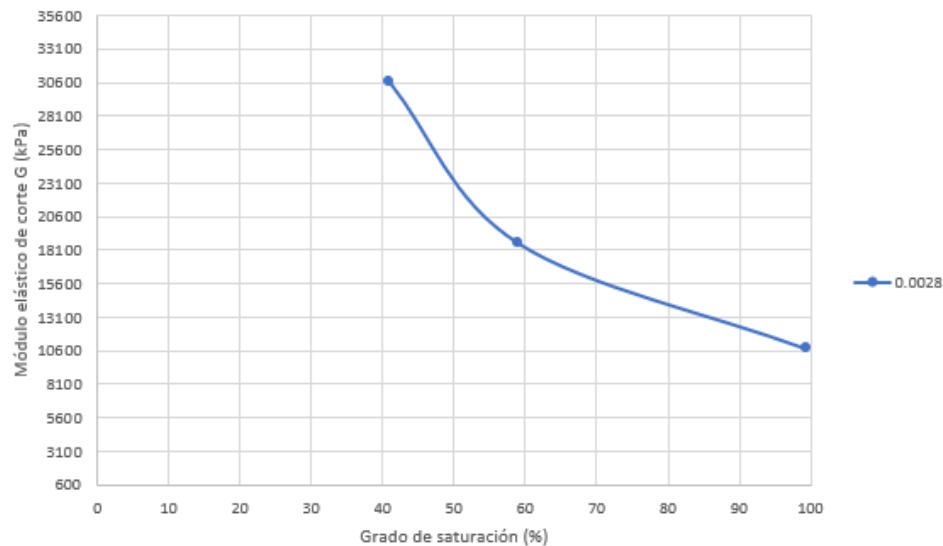


Figura 100: relación del módulo elástico de corte-grado de saturación para el caso de menor deformación de corte

En cuanto al factor de amortiguamiento, cabe decir que éste no varía mucho con los diferentes grados de saturación, pero se ve un leve aumento de factor de amortiguamiento a medida que el grado de saturación aumenta, en este caso también con la excepción del caso de la muestra totalmente saturada, como puede verse en la siguiente Tabla 18.

MUESTRA	Etapa	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Deformación de corte (εq)	0.0056	0.0062	0.0066	0.0075	0.0083	0.0095	0.0109	0.0125	0.0152
	Factor de amortiguamiento de	0.119193	0.128363	0.131683	0.140613	0.143382	0.123124	0.138633	0.114378	0.126305
Etapa		3	4	5	6	7	11	12	13	
2	Deformación de corte (εq)	0.0042	0.0028	0.0057	0.0043	0.0045	0.0078	0.0087	0.0096	
	Factor de amortiguamiento de	0.11534	0.083495	0.142617	0.101083	0.076738	0.156489	0.117703	0.15938	
Etapa		4	5	6	7	8				
3	Deformación de corte (εq)	0.0028	0.0035	0.0058	0.0092	0.0137				
	Factor de amortiguamiento (D)	0.07232	0.105098	0.1182	0.16342	0.173816				
Etapa		3	4	6	7	8	9	10	11	12
4	Deformación de corte (εq)	0.0038	0.0053	0.0068	0.0088	0.0103	0.0122	0.0153	0.0179	0.0215
	Factor de amortiguamiento de	0.13452	0.141292	0.140315	0.13287	0.167157	0.171248	0.172756	0.16961	0.167231
Etapa		8	9	10	11	12	13	14		
5	Deformación de corte (εq)	0.0022	0.004	0.0024	0.0023	0.0024	0.0027	0.0026		
	Factor de amortiguamiento de	0.055154	0.092717	0.109535	0.093001	0.092024	0.122262	0.092029		

Tabla 18: Valores de deformación de corte y factor de amortiguamiento de todas las etapas de todas las muestras ensayadas en el equipo triaxial

En la Figura 101, se ve la relación entre el factor de amortiguamiento y el grado de saturación de la muestra, dependiendo de las distintas deformaciones de corte. Cuanto menor es el grado de saturación, menor es el rango de deformación de corte, y menor es el factor de amortiguamiento. Es decir, el caso en el que el grado de saturación sea del 20%, el rango de la deformación de corte varía entre 0.005 y 0.014, con un valor máximo del factor de amortiguamiento de 0.143, y en cambio, en el caso de la muestra con un grado de saturación del 80 %, el rango de deformación de corte es mayor, ya que varía entre 0.004 y 0.02, y el factor de amortiguamiento llega a un valor de hasta 0.172.

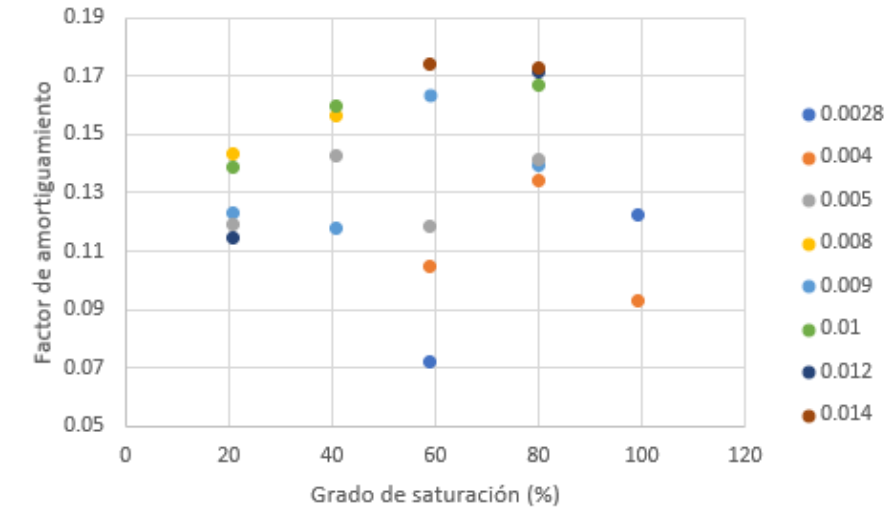


Figura 101: Relación factor de amortiguamiento-grado de saturación, dependiendo de las distintas deformaciones de corte

En la Figura 102, se observa la relación entre el factor de amortiguamiento para la deformación de corte más alta y más baja, con el grado de saturación (%) de las muestras. Se observa que, en el caso de la menor deformación de corte, el factor de amortiguamiento tiende primero a disminuir a medida que aumenta el grado de saturación, hasta llegar a un punto donde, la tendencia cambie y sea ascendente. En cambio, en el caso de la mayor deformación de corte analizada, se observa que el factor de amortiguamiento tiende a ascender a medida que aumenta el grado de saturación, hasta un punto donde empieza a disminuir.

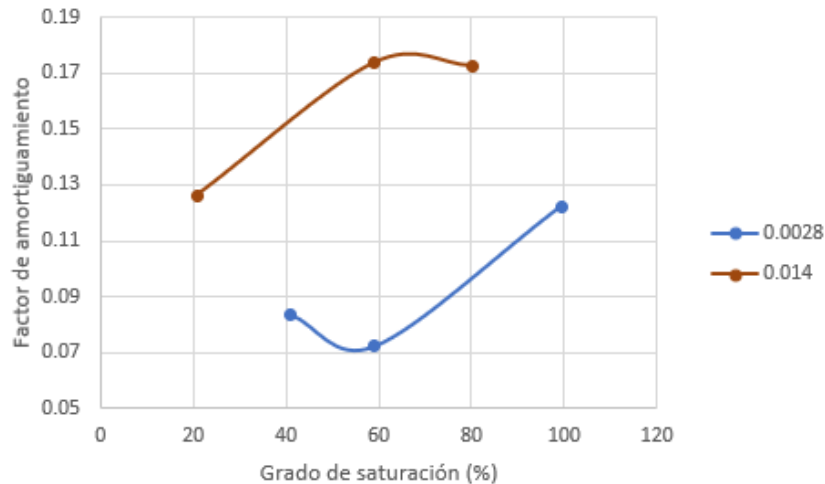


Figura 102: Relación factor de amortiguamiento-grado de saturación, para deformaciones de corte más alta y más bajas

La Figura 103 muestra lo mismo concluido en la Figura 101, pero en este caso relacionando el factor de amortiguamiento y la humedad de la muestra, dependiendo de las distintas deformaciones de corte. Se puede apreciar que, como se ha mencionado anteriormente, a medida que aumenta la humedad, aumenta el factor de amortiguamiento y también aumenta el rango de la deformación de corte, con la excepción del ensayo realizado con la muestra totalmente saturada.

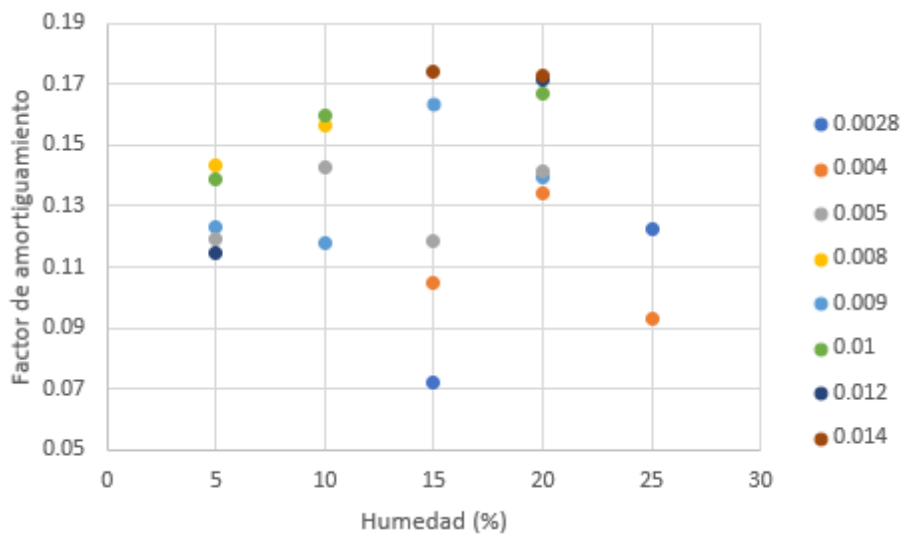


Figura 103: Relación factor de amortiguamiento-humedad, dependiendo de las distintas deformaciones de corte

Para finalizar, mencionar que las muestras ensayadas en el equipo triaxial, y las muestras ensayadas en el equipo de columna resonante (muestras fabricadas en las mismas condiciones), han dado valores razonables para el módulo de corte y el factor de amortiguamiento. En general se ha encontrado una buena concordancia entre los resultados de ambos equipos, teniendo en cuenta que estudian el suelo a un nivel de deformación diferente (mayor en el triaxial y menor en la columna resonante).

10. Futuras líneas de investigación

En general se han obtenido resultados coherentes con la tendencia conocida para los suelos: el módulo de corte disminuye con la deformación de corte y el factor de amortiguamiento aumenta con la deformación de corte. Sin embargo, no hay información suficiente sobre la influencia del grado de saturación en estos parámetros. Este trabajo intenta completar esa información y los trabajos futuros deberían trabajar en esa dirección para confirmar las tendencias encontradas.

En particular, en cuanto a resultados, se propone realizar más ensayos para muestras con un valor de grado de saturación cercano a 0 y a 1, ya que son muestras más complicadas de realizar y de las cuales hay menor número de resultados.

Se propone también realizar los ensayos con más muestras con diferentes densidades secas, distintas a la utilizada en los ensayos del presente documento.

Además, se propone realizar un trabajo de fin de máster enfocado solamente a analizar el grado de saturación y el módulo de corte bajo cargas cíclicas para muestras que estén totalmente saturadas. La variación de estos parámetros con el grado de saturación no está clara y en particular, cerca de saturación los resultados no son concluyentes. Es preciso hacer más ensayos en esa situación para establecer patrones de comportamiento definidos.

11. Bibliografía

Braja M. Das, G.V. Ramana (2010). Principles of Soil Dynamics, Second Edition. Editorial Cengage Learning.

Canseco, A. (2019). Estudio experimental del efecto de la saturación en el amortiguamiento dinámico de suelos compactados. Trabajo de Fin de Máster. Departamento de ingeniería civil y ambiental, UPC.

Castillo Aristy, P. M. (2014). Estudio de la frecuencia en la deformación en condiciones edométricas de un suelo compactado sometido a carga cíclica. Tesina de Máster. Departamento de ingeniería del terreno, cartográfica y geofísica, UPC.

Cháves Negrete, C. (2004). Estudio del comportamiento triaxial de materiales granulares de tamaño medio con énfasis en la influencia de la succión. Tesina de Máster. Departamento de ingeniería del terreno, cartográfica y geofísica, UPC.

García Loncomilla, C. (2011). Triaxial verdadero con succión controlada: ensayos y modelación. Tesina de Máster. Departamento de ingeniería civil y ambiental, UPC.

Illa, J. (2009). Una investigación sobre las tensiones efectivas en suelos no saturados. Trabajo Final de Máster. Trabajo de Fin de Máster. Departamento de ingeniería civil y ambiental, UPC.

Lloret, A. (2017). Apuntes asignatura Master en Ingeniería del Terreno. Mecánica de suelos avanzada, Barcelona. Departamento: Ingeniería civil y ambiental, UPC.

Lu, H. (2016). Double hardening soil model for soil behavior. Formulation, implementation and application. Tesina de Máster. Departamento de ingeniería civil y ambiental.

Poucell Mier y Terán, J. (2016). Amortiguamiento en suelos compactados. Trabajo de Fin de Máster. Departamento de ingeniería civil y ambiental, UPC.

Rodas Aldana, E. J. (2007). Caracterización geotécnica de residuos de minas de sal. Tesina de Máster. Departamento de ingeniería del terreno, cartográfica y geofísica, UPC.

Suriol Castellví, J., 1993. Medida de la deformabilidad de suelos mediante el equipo de columna resonante. *Revista de obras públicas*, pp. 57 - 66.

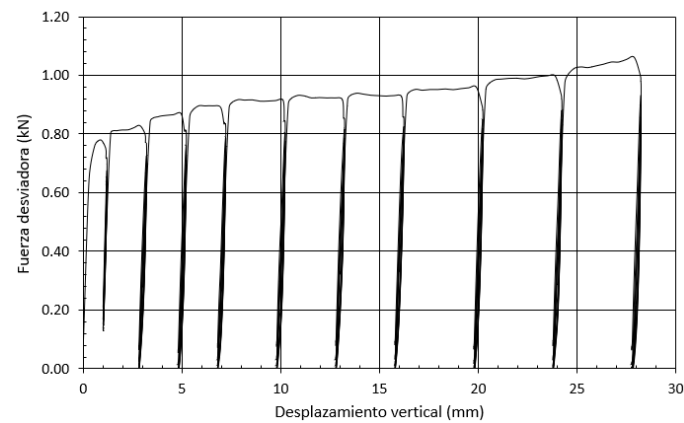
Suriol, J., Romero, E., Lloret, A. & Vaunat, J. (2014). Small-strain shear stiffness of compacted clays: Initial state and microstructural features. Unsaturated soils: Reach & applications – Khalili, Russell & Khoshghalb (Ed). Taylor & Francis Group, London, pp. 769 - 775.

Villavicencio, J. (2008). Suelo con cambio de volumen. Trabajo de Fin de Máster. Departamento de ingeniería civil y ambiental, UPC.

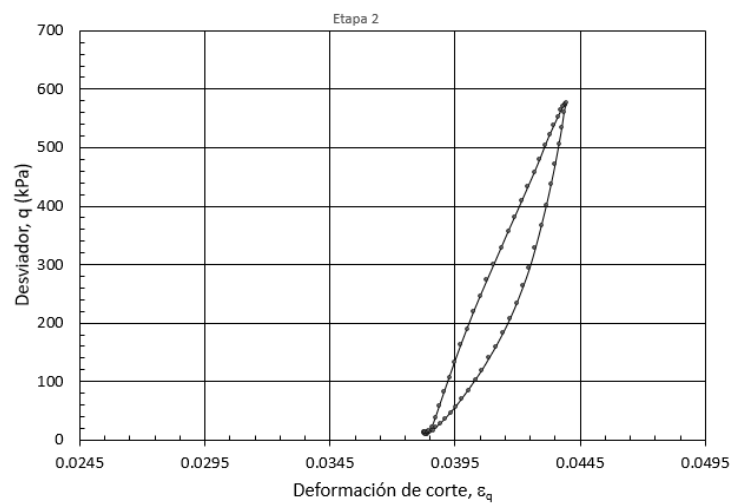
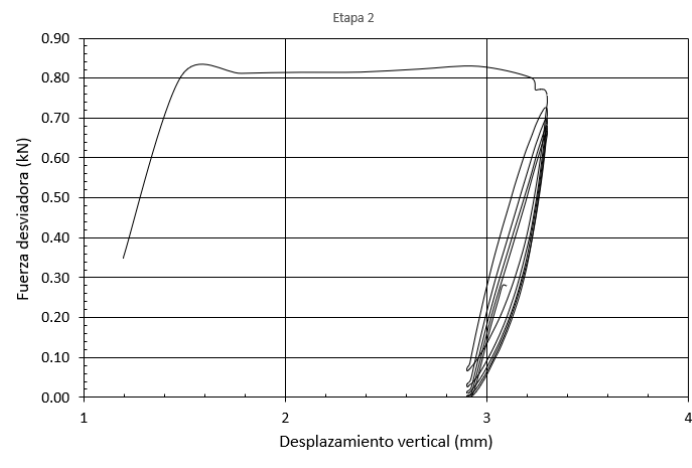
Yu, H.S. (1988). CASM: A unified state parameter model for clay and sand. International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 22, pp. 621 - 653.

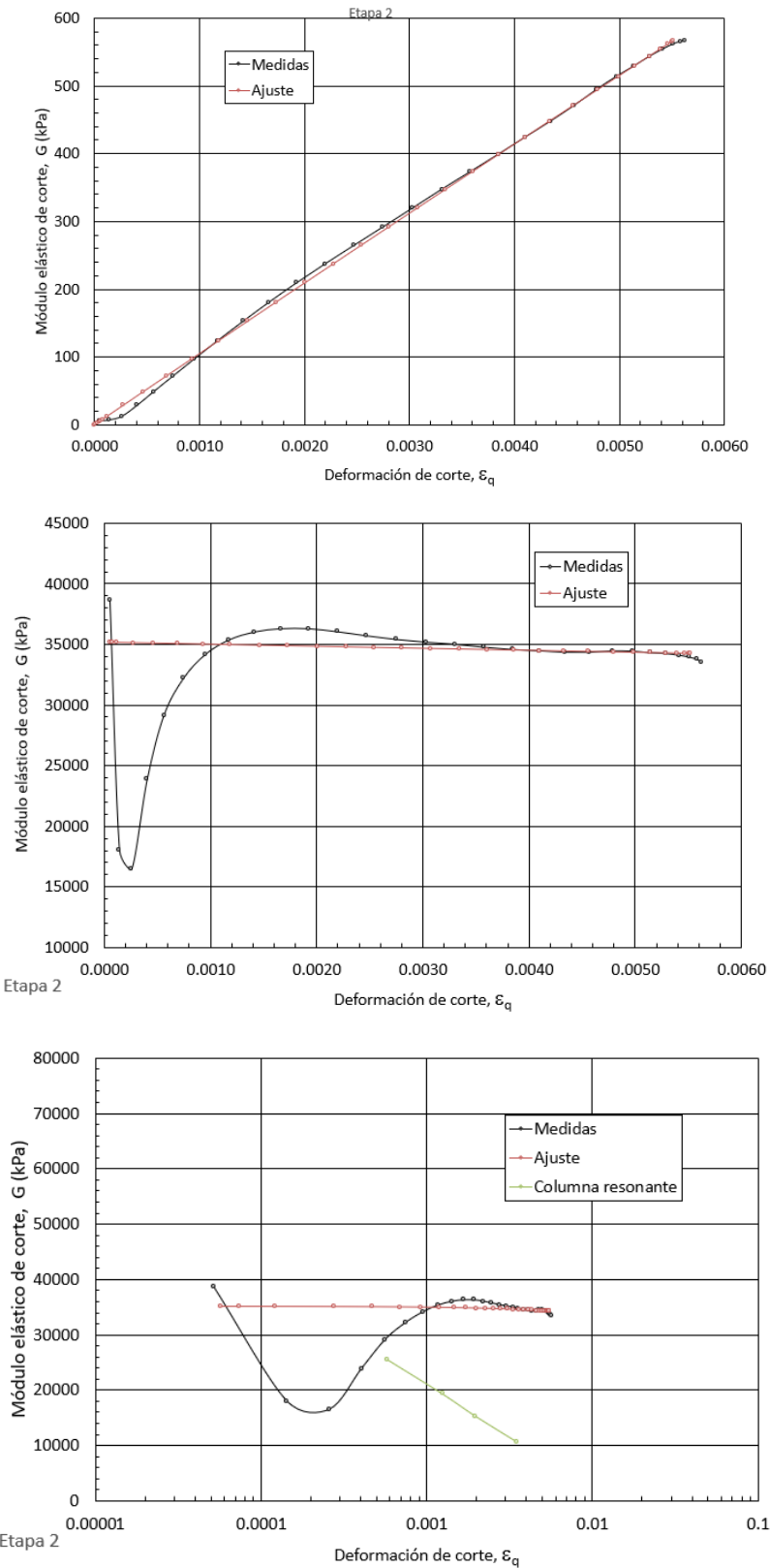
12. Anexos

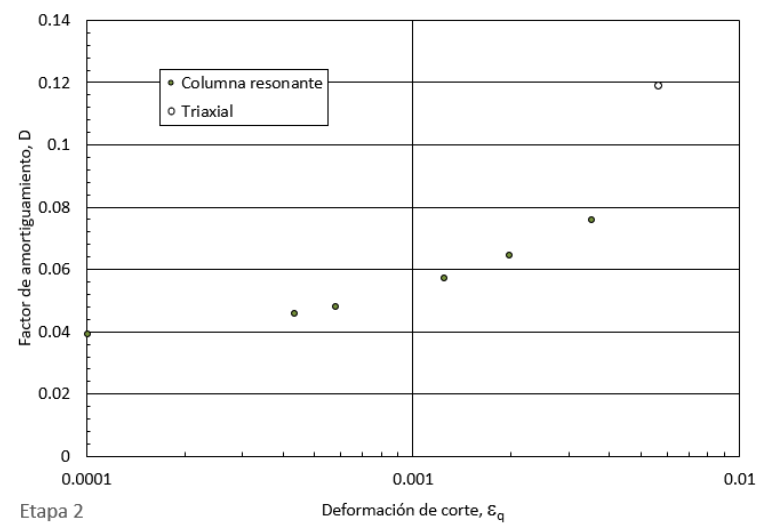
12.1. Anexo muestra 1



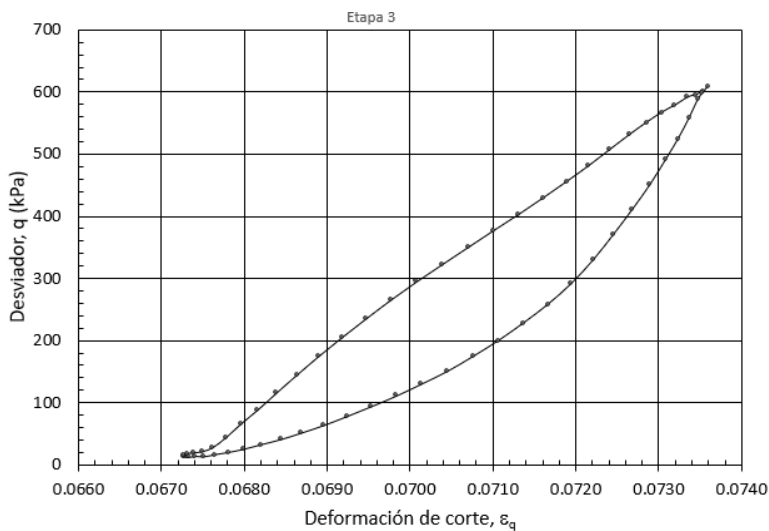
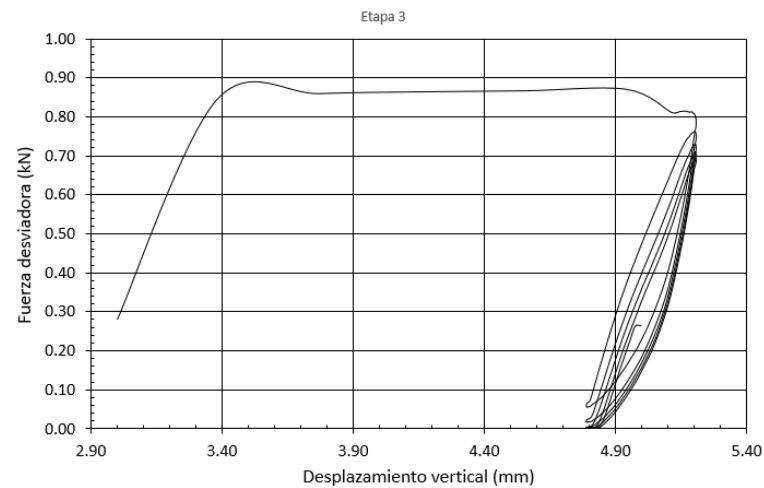
Etapa 2

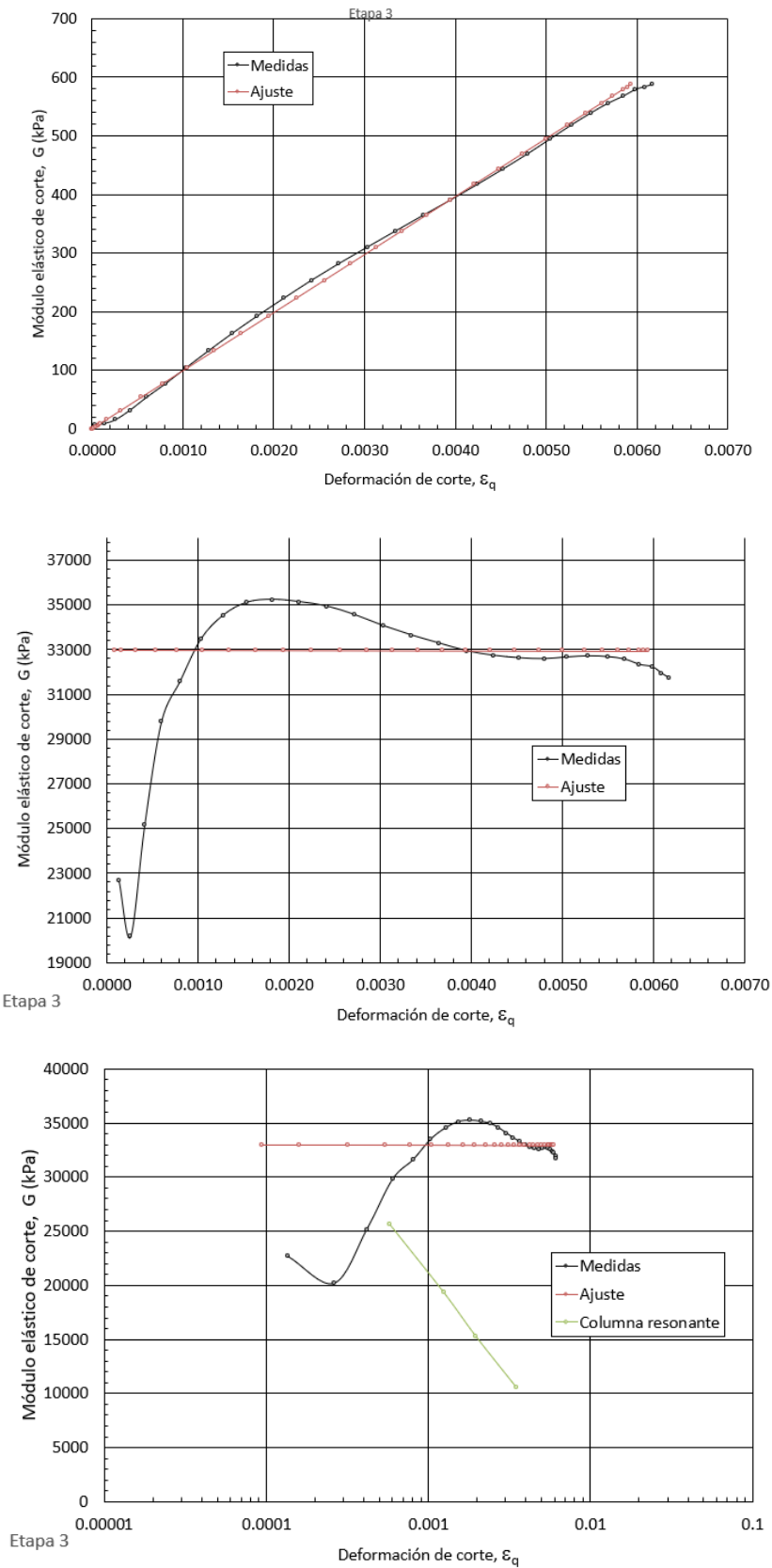


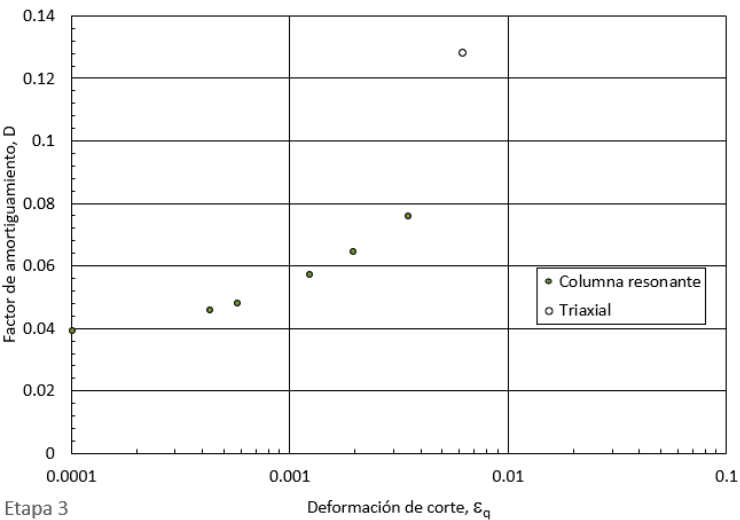




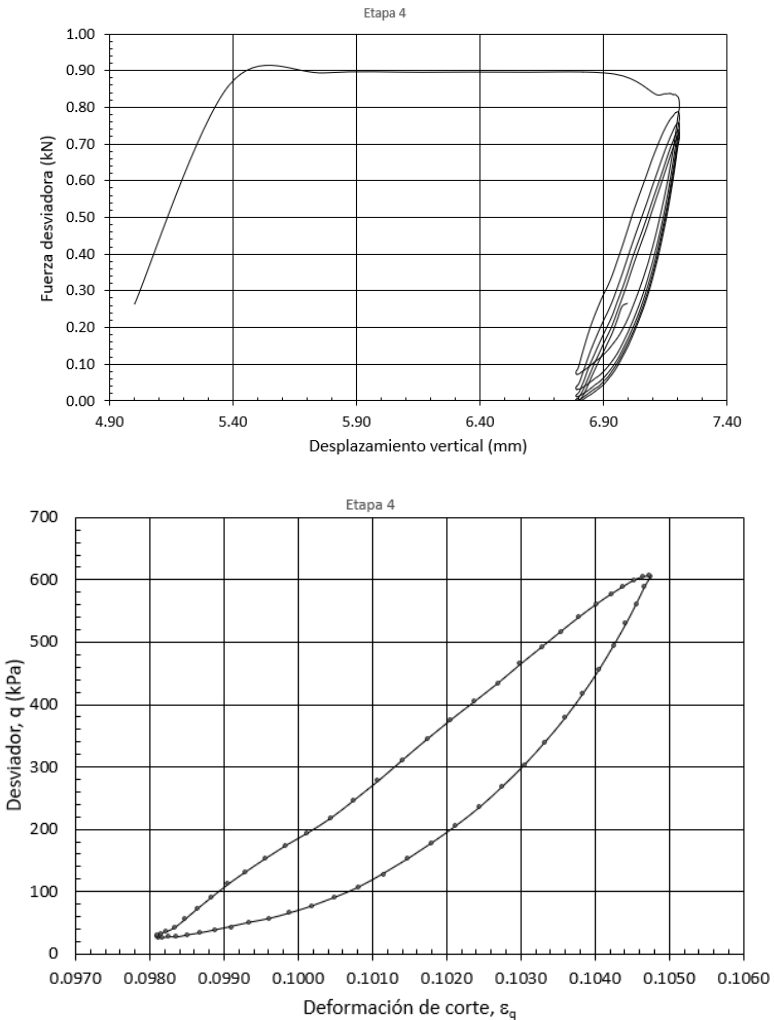
Etapa 3

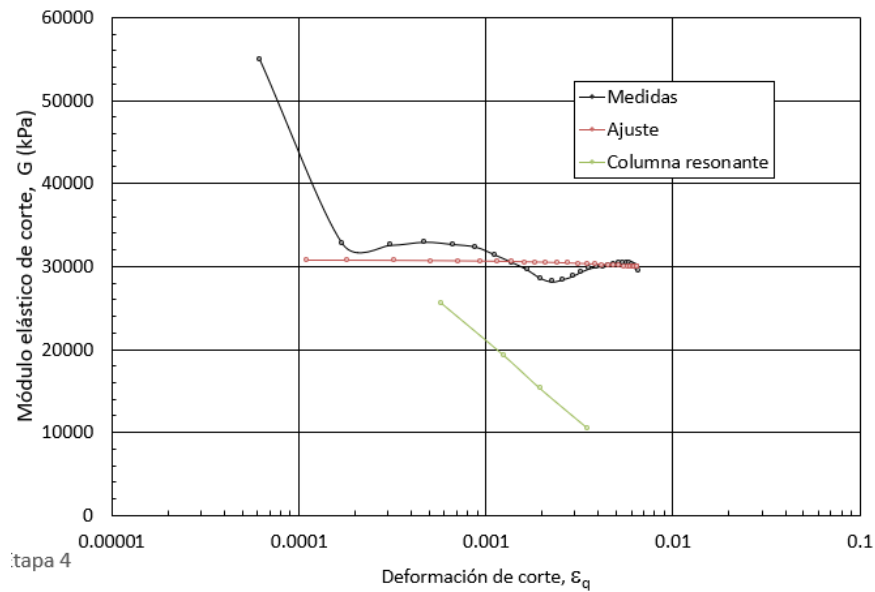
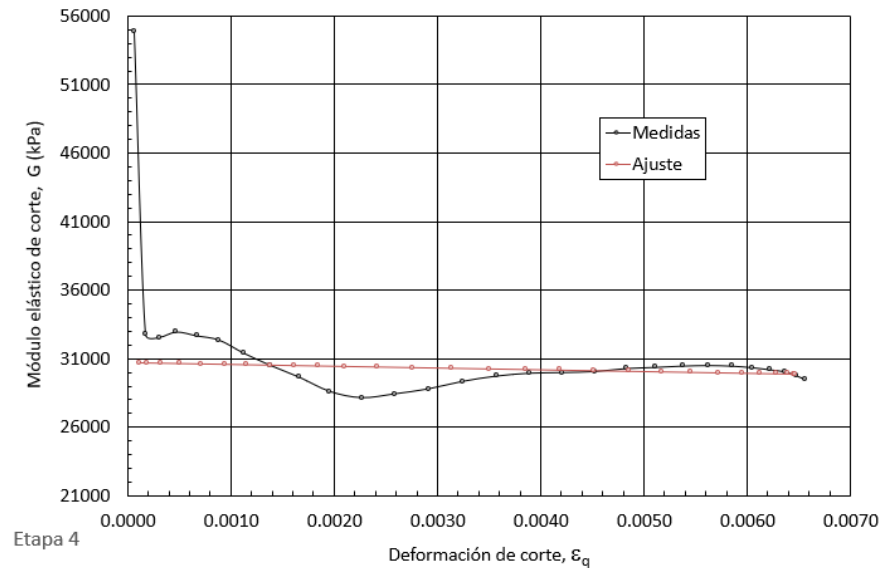
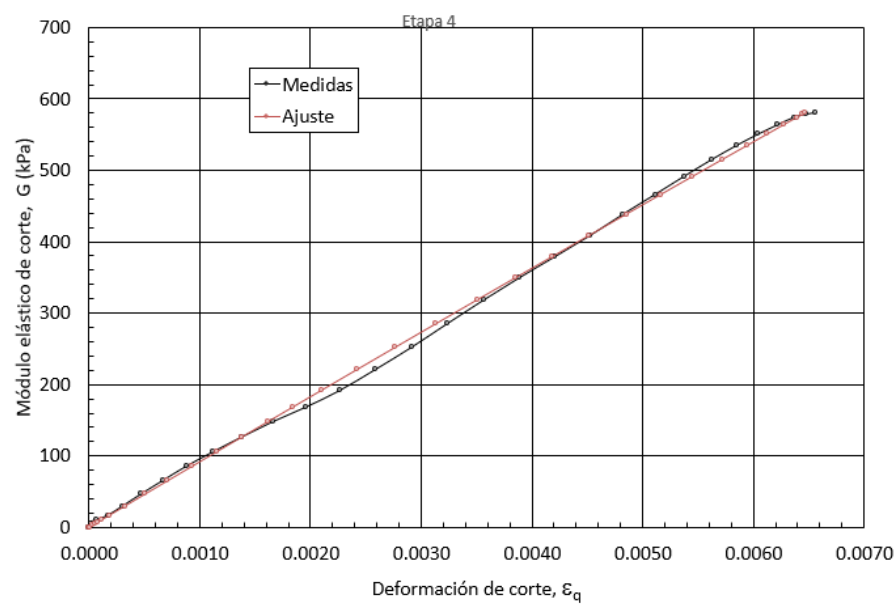


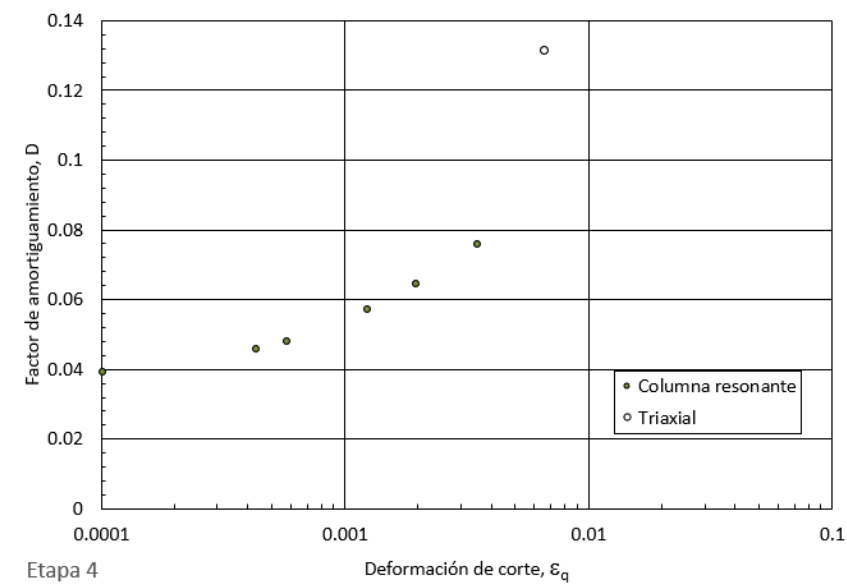




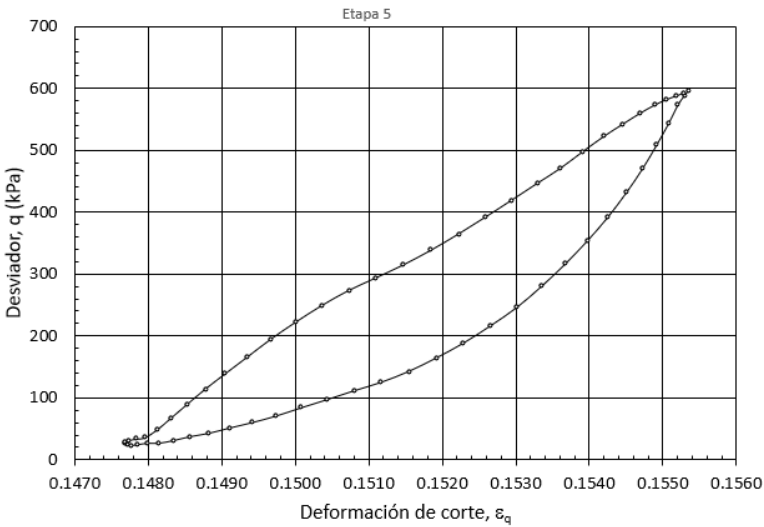
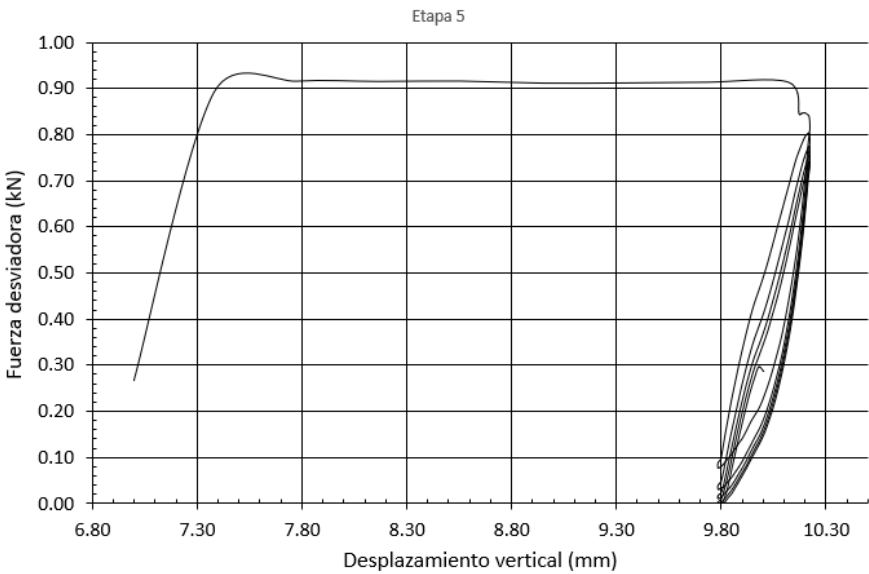
Etapa 4

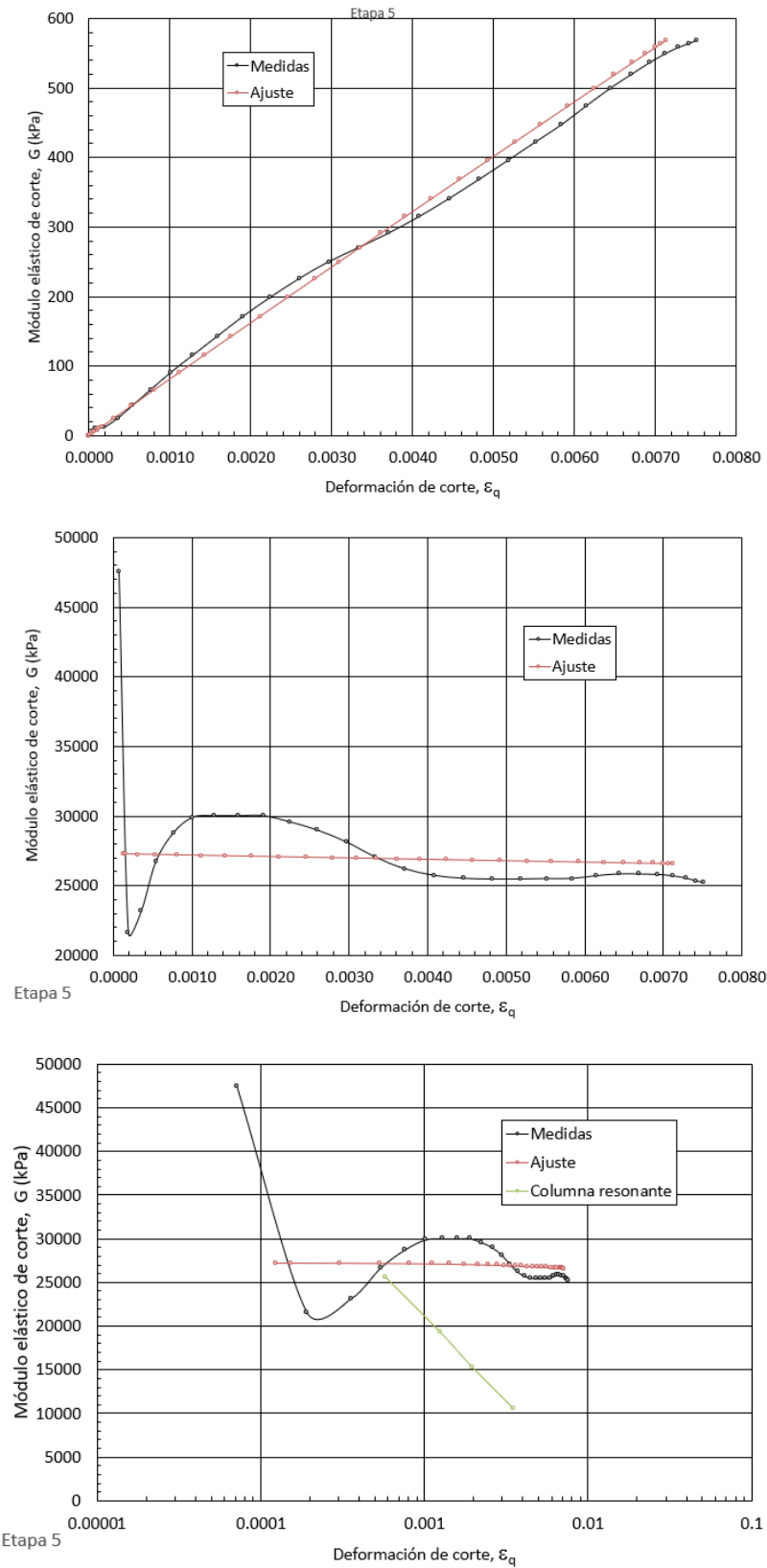


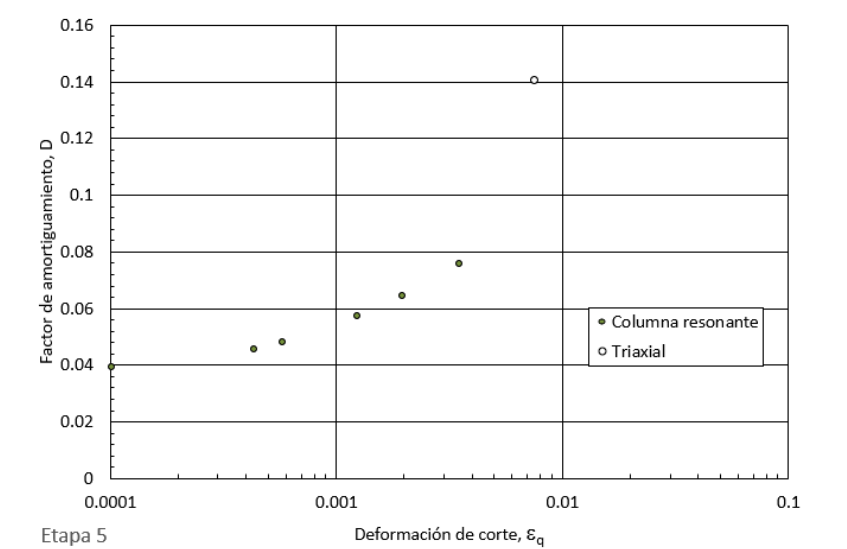




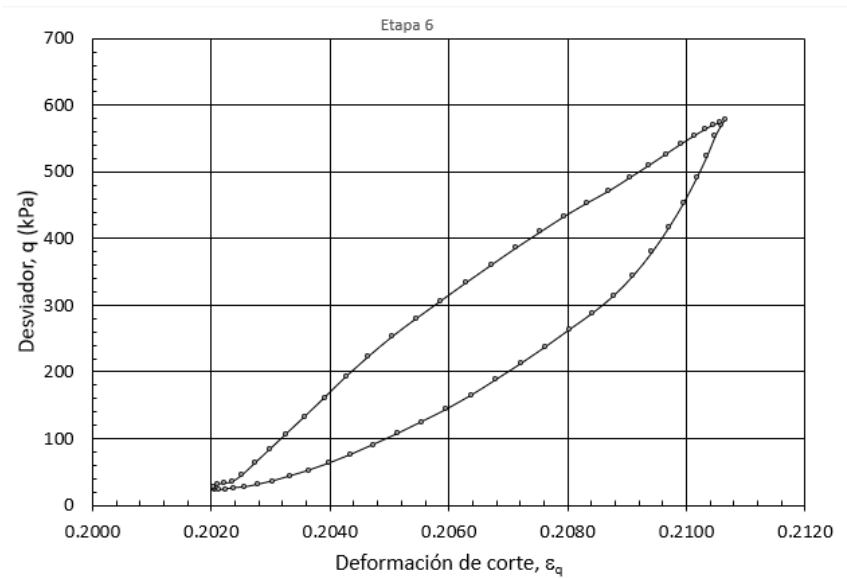
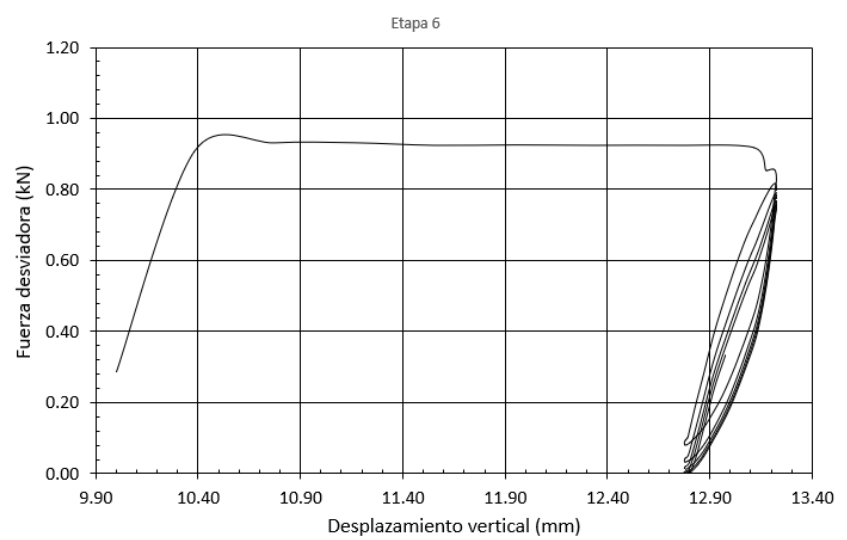
Etapa 5

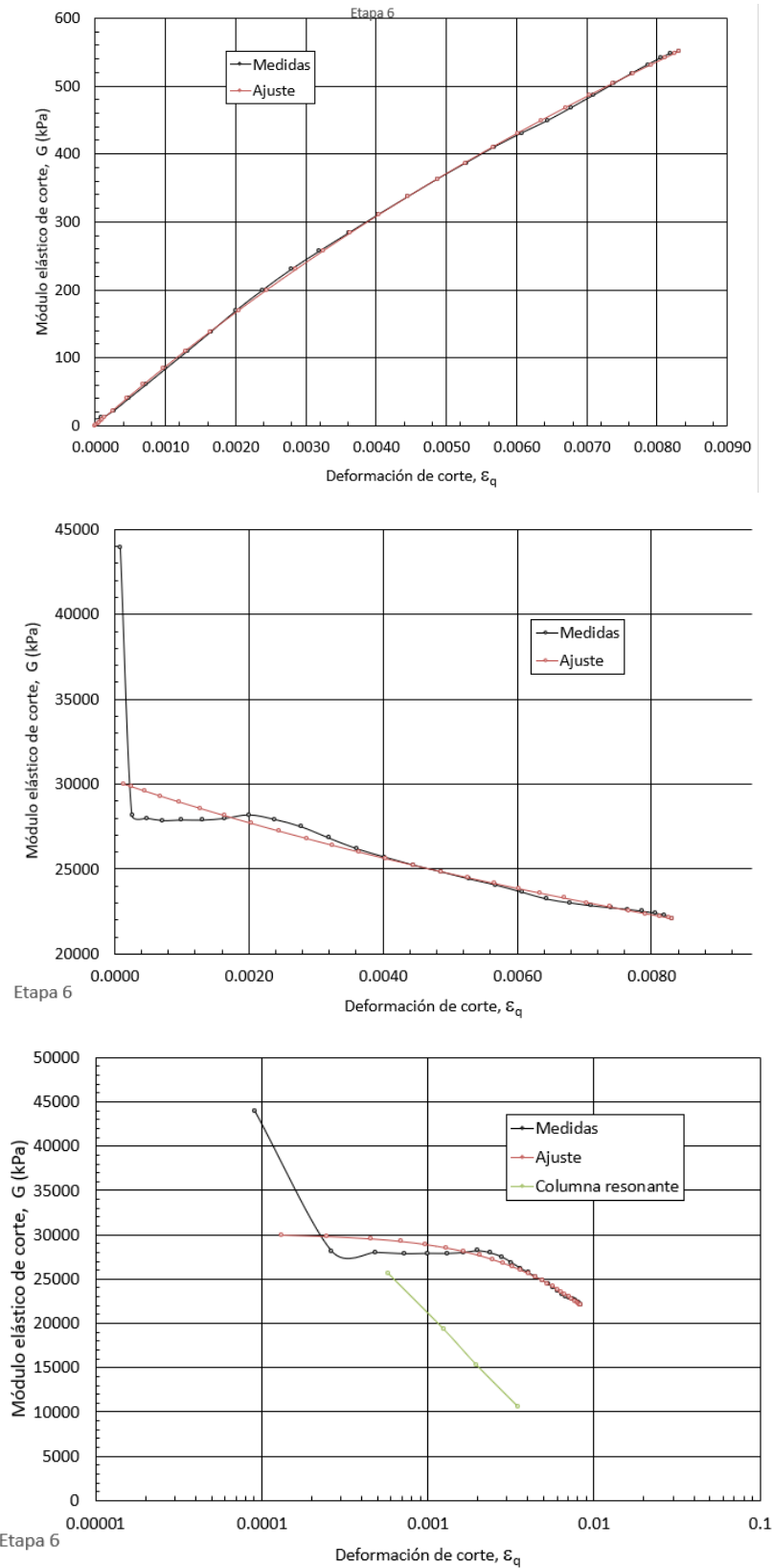


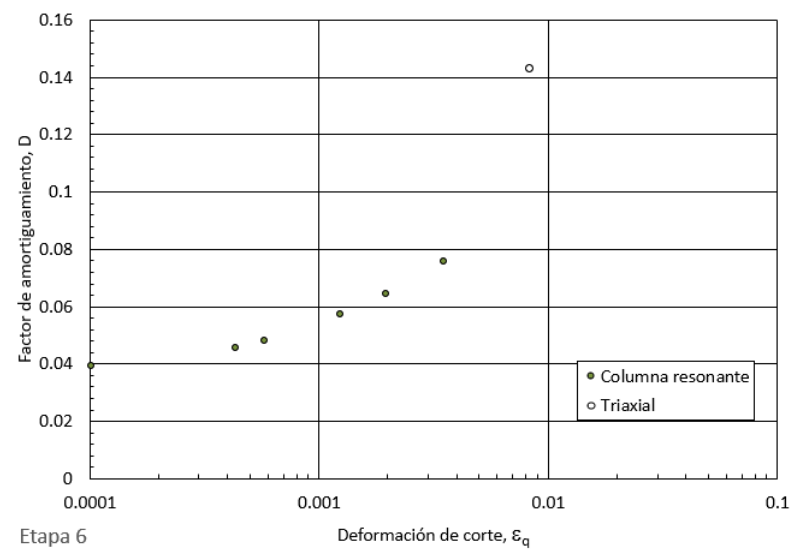




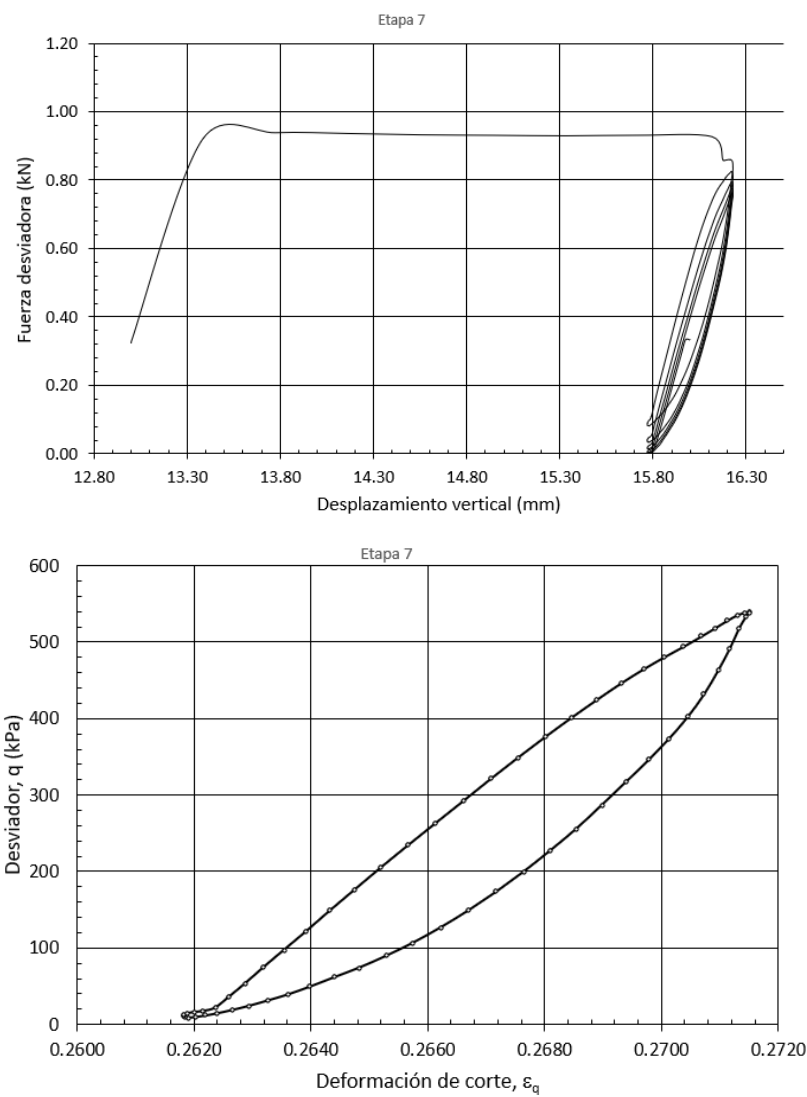
Etapa 6

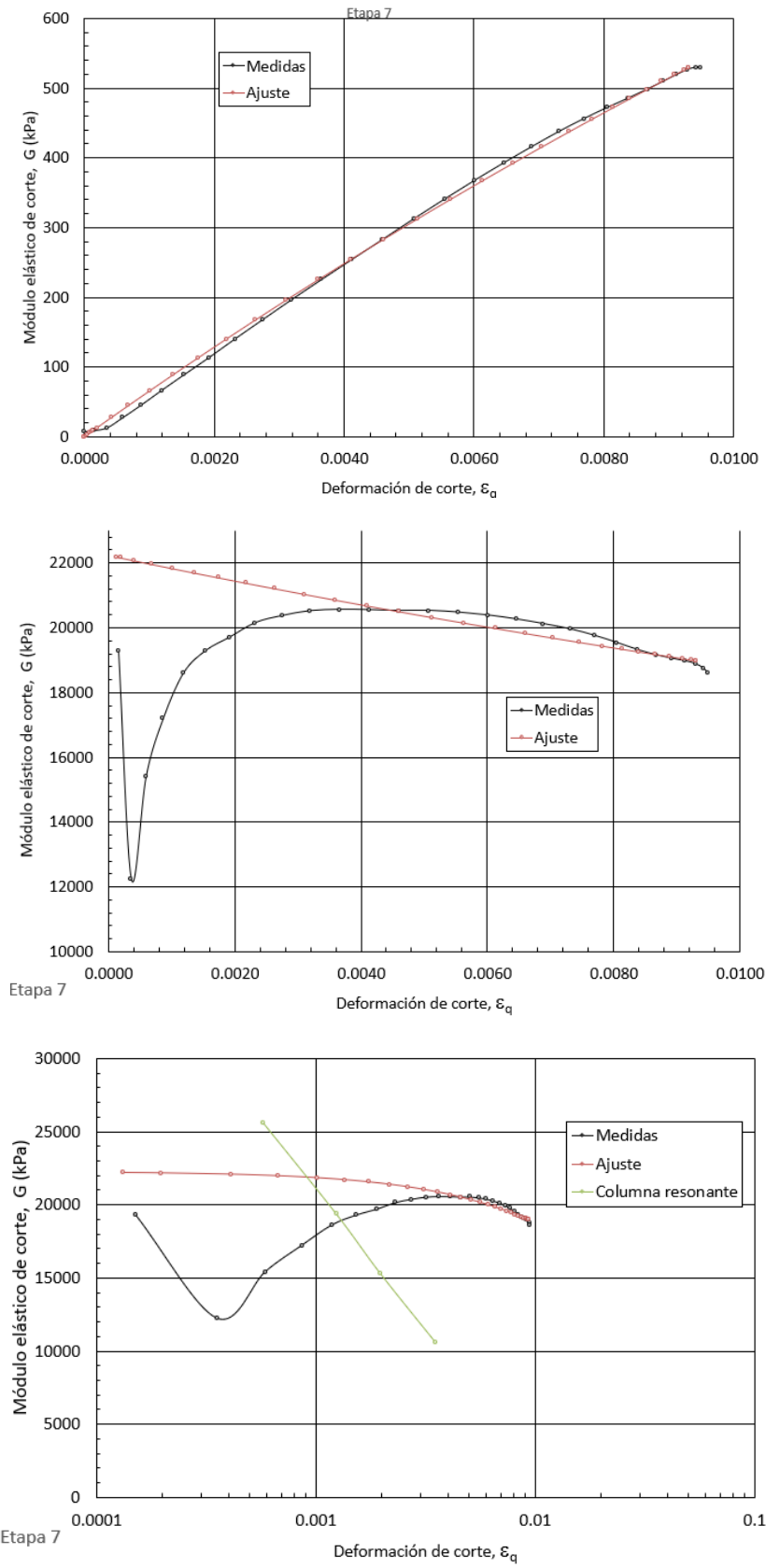


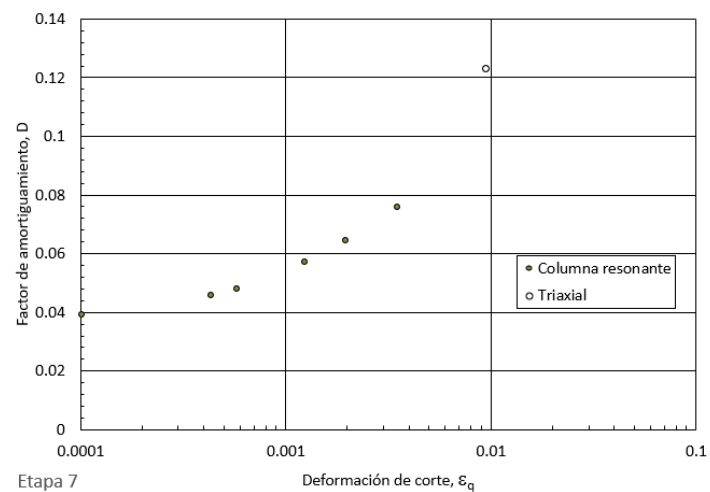




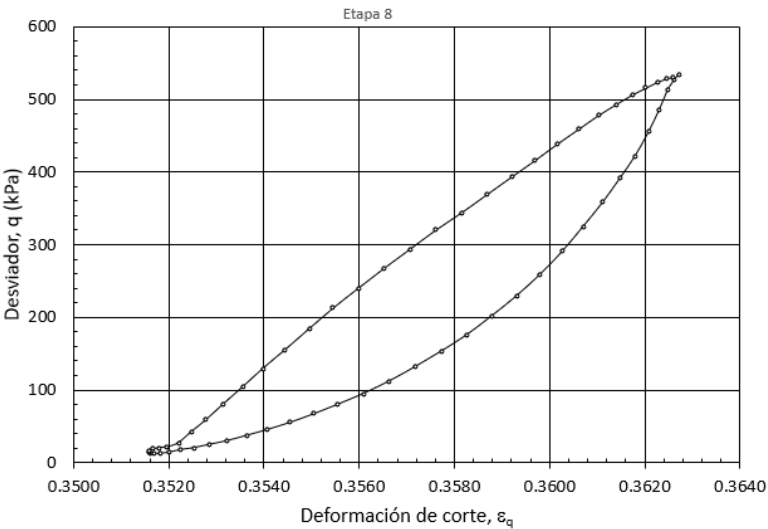
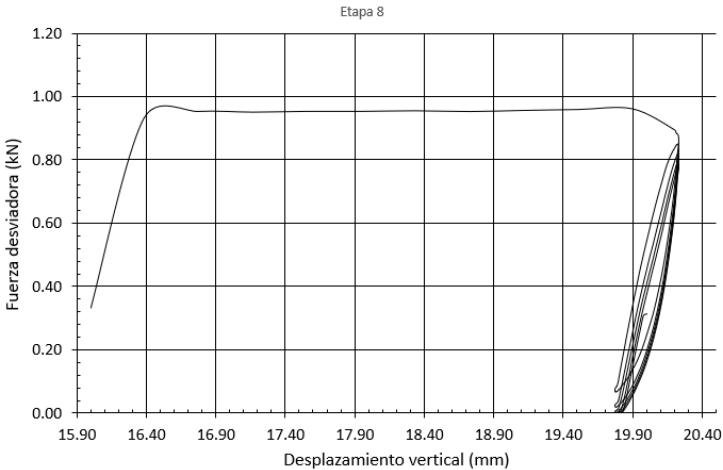
Etapa 7

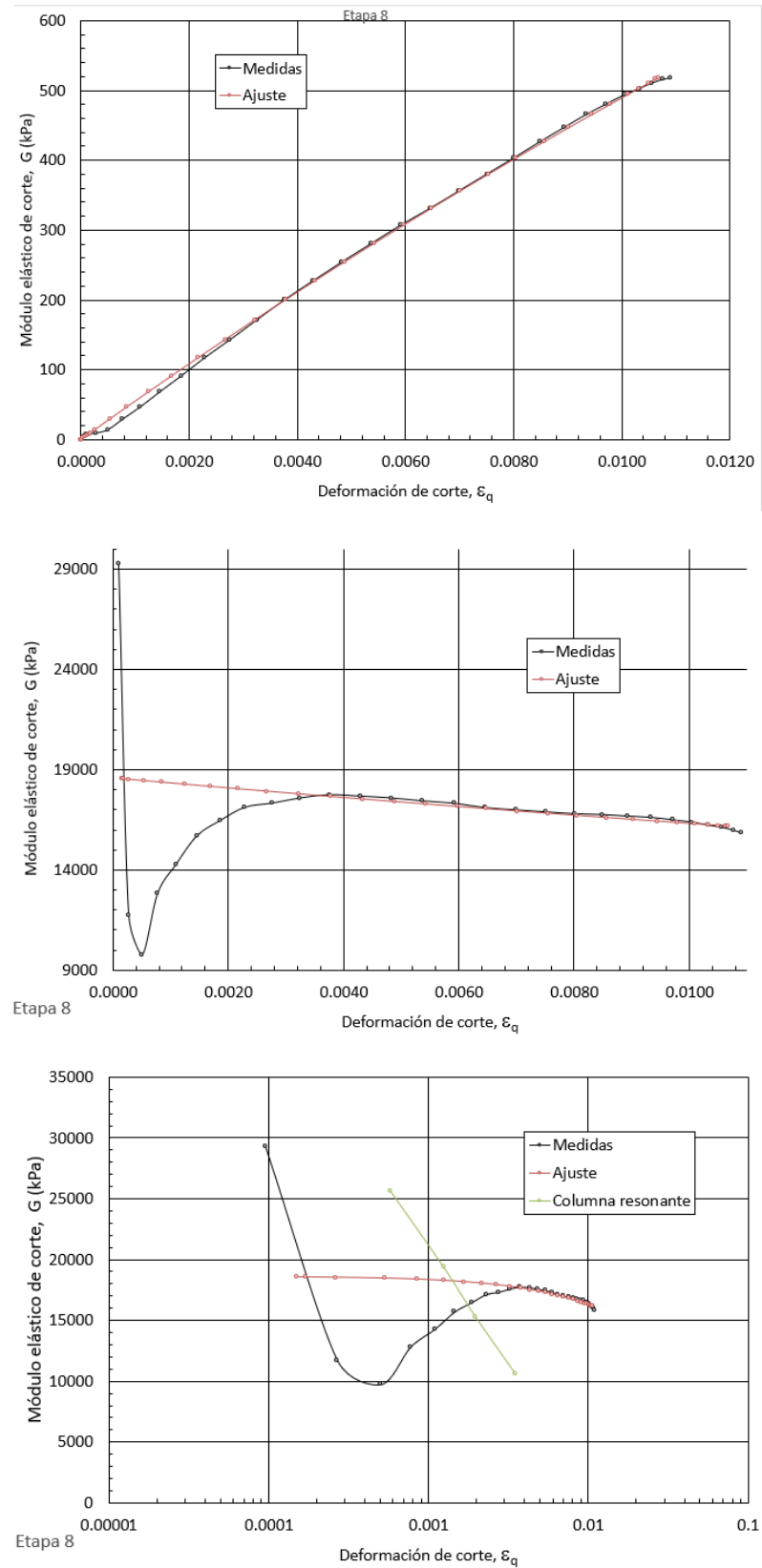


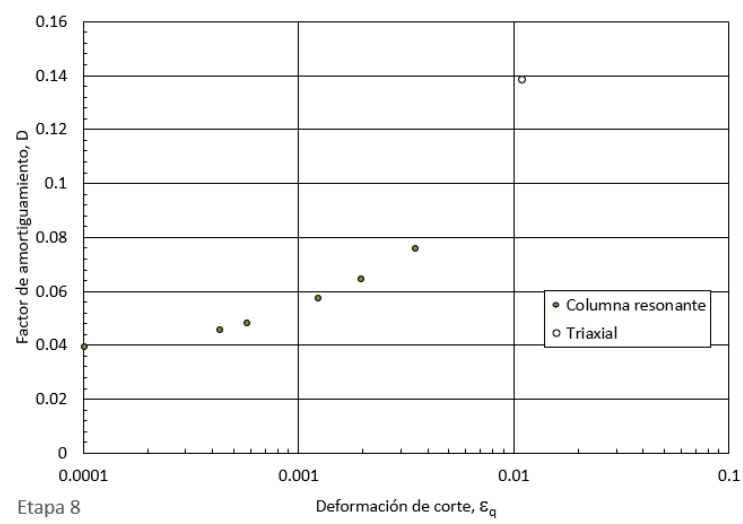




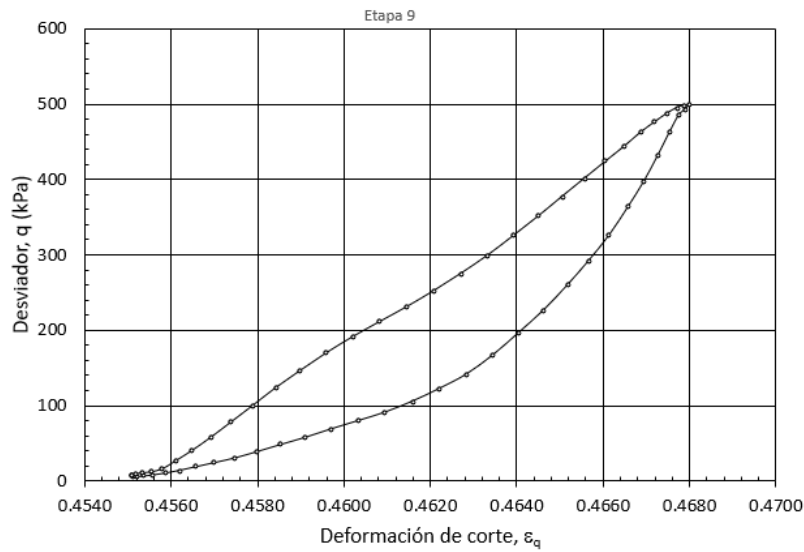
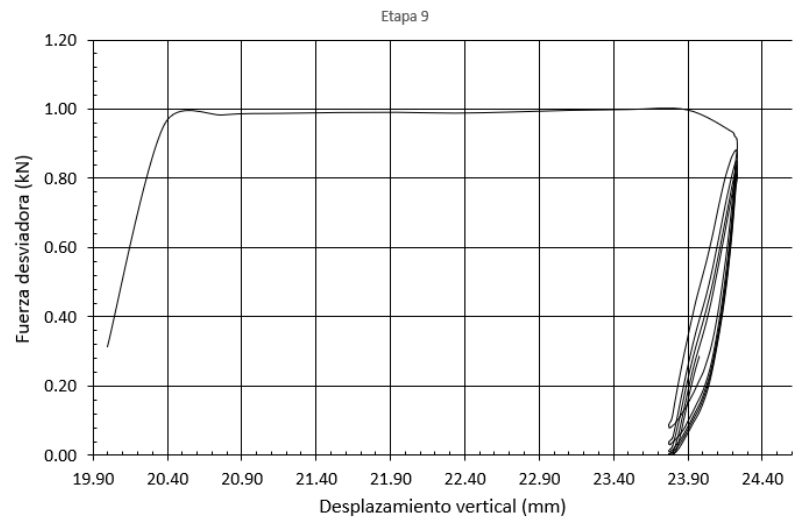
Etapa 8

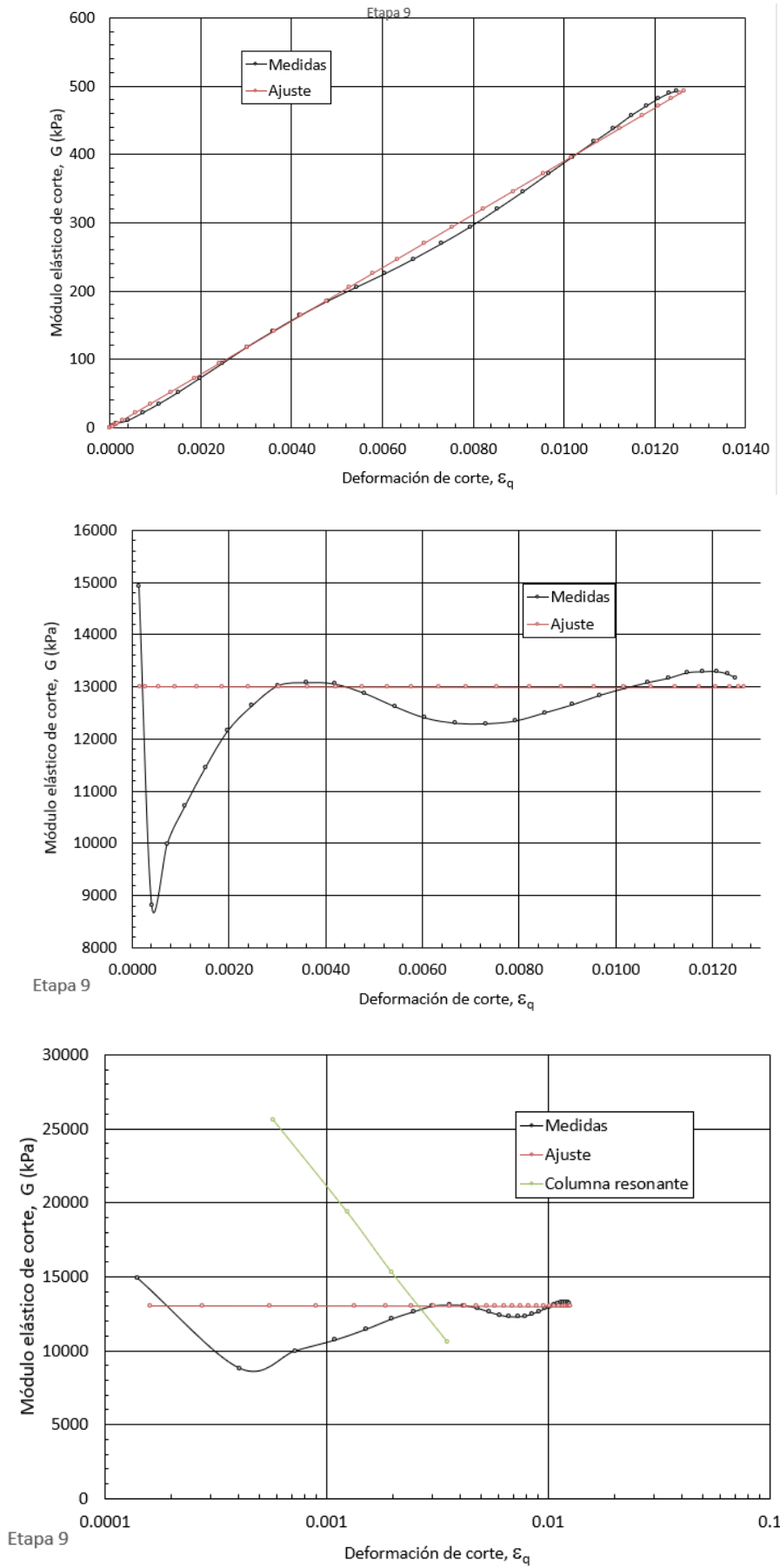


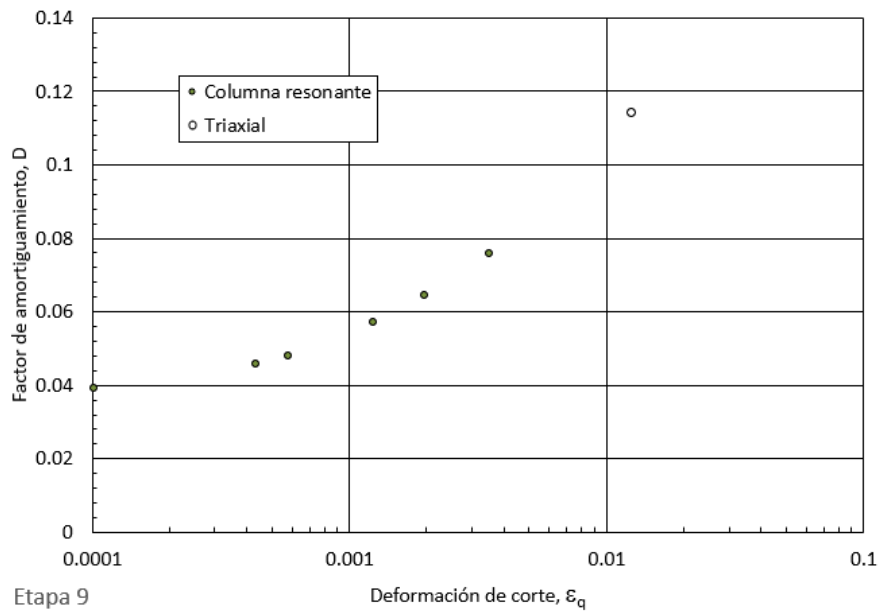




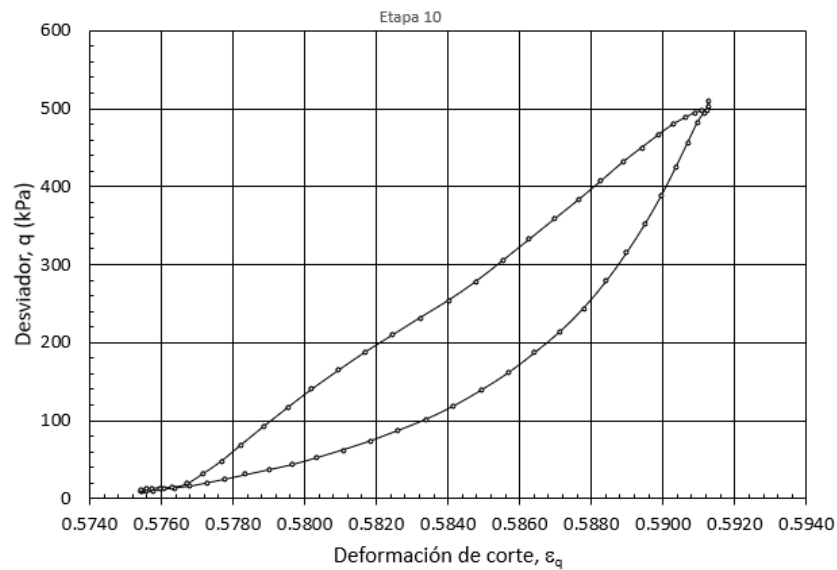
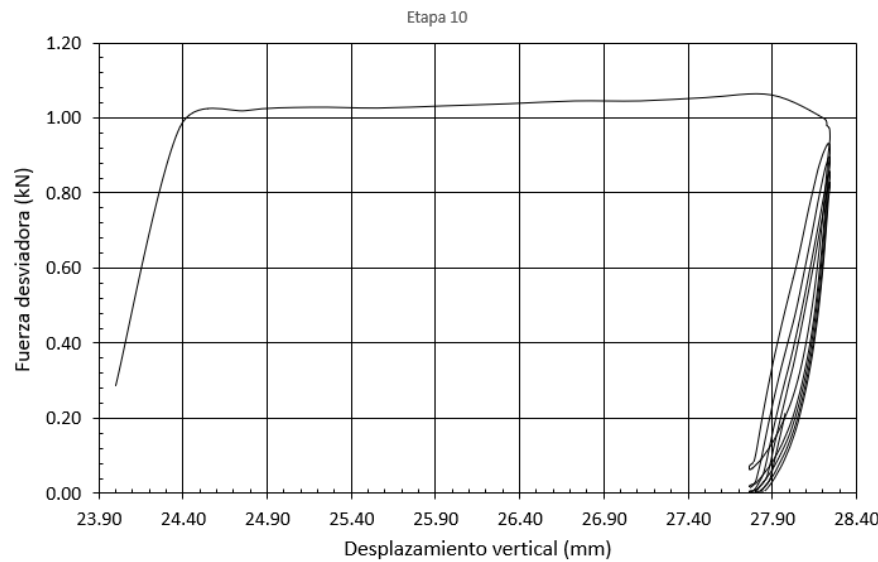
Etapa 9

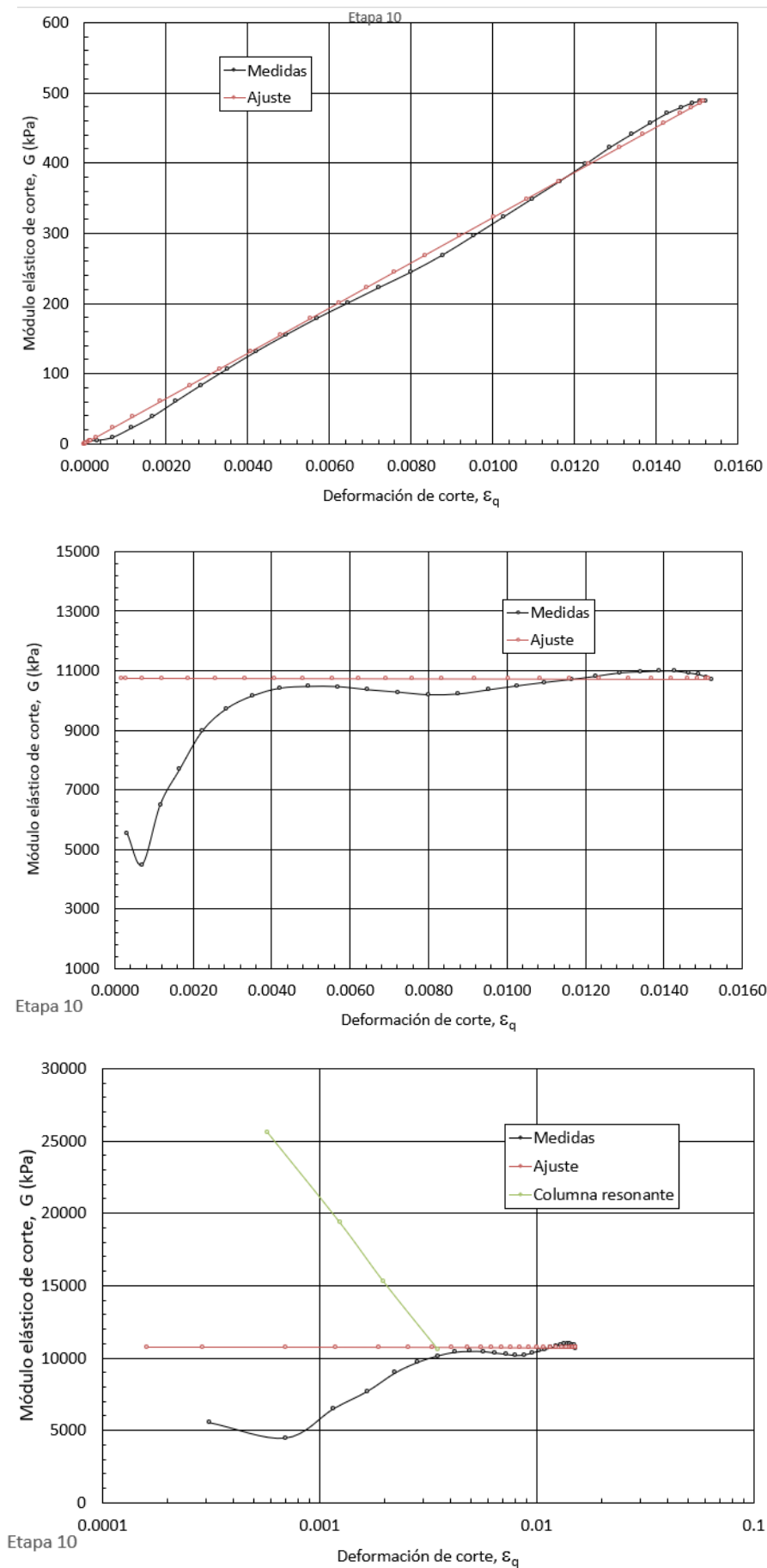


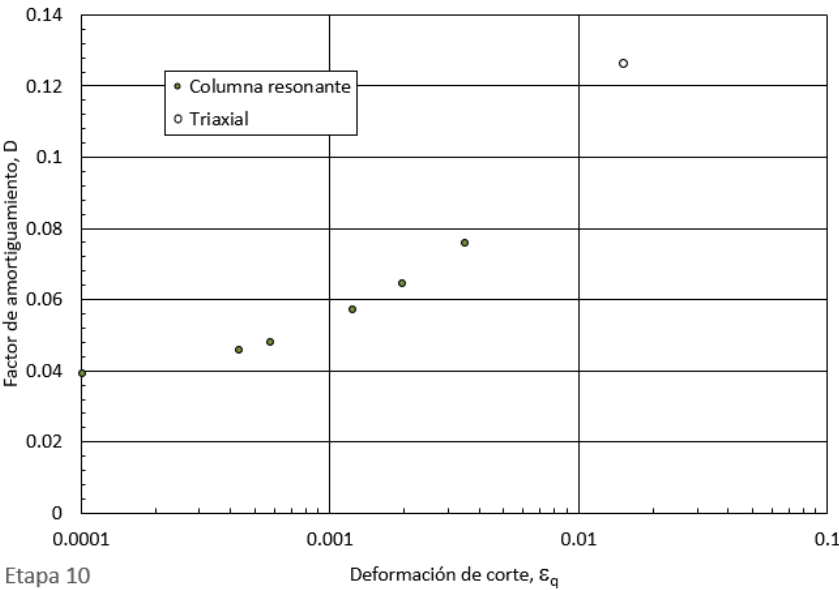




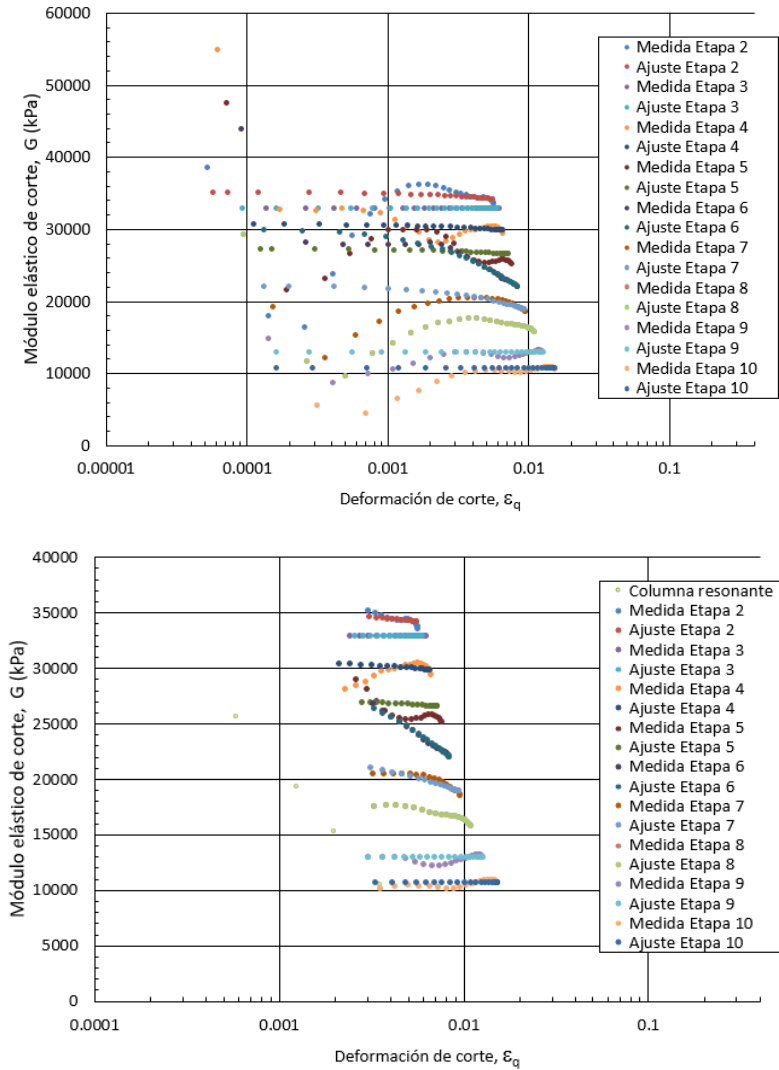
Etapa 10

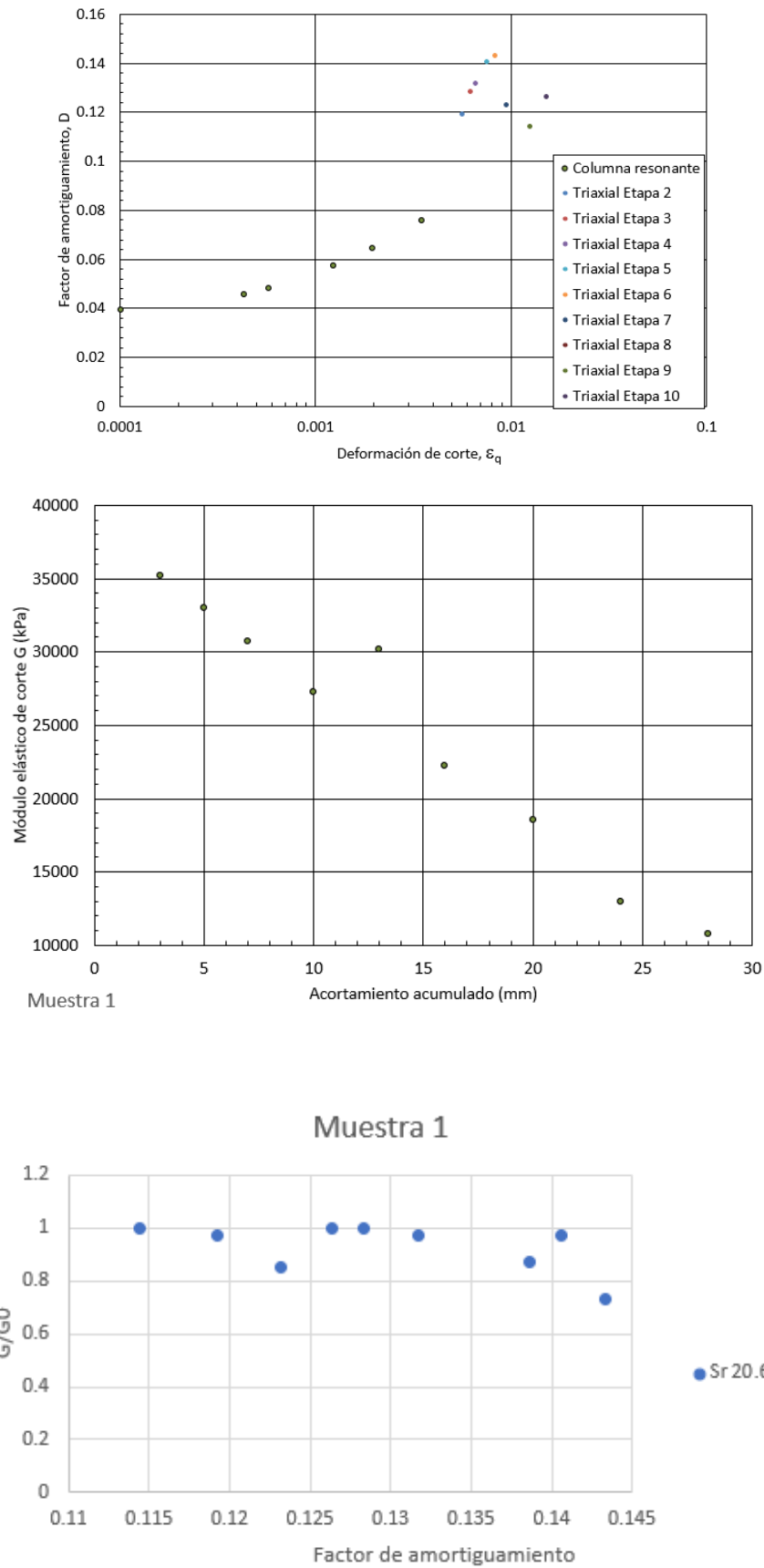




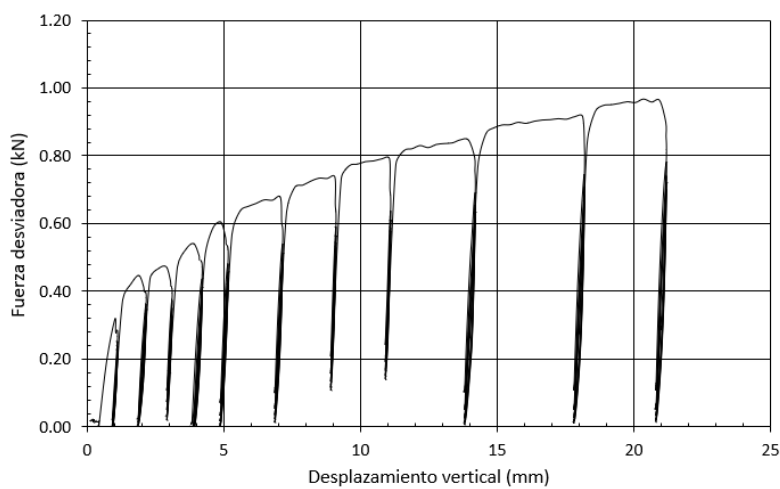


Todas las etapas

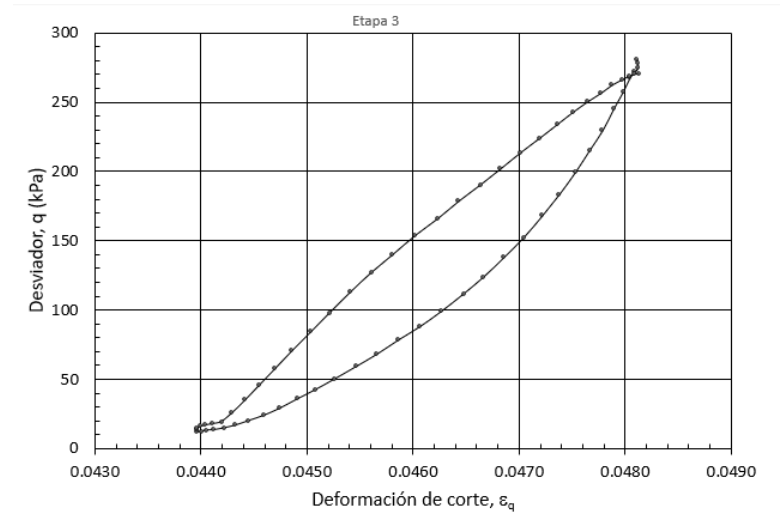
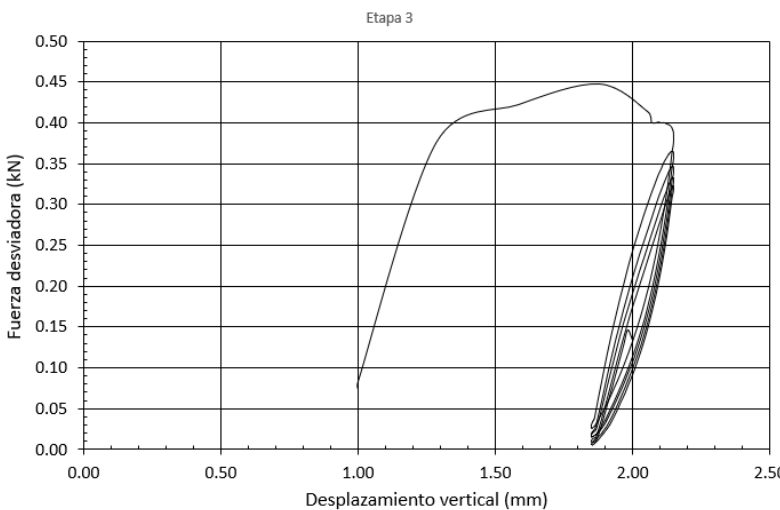


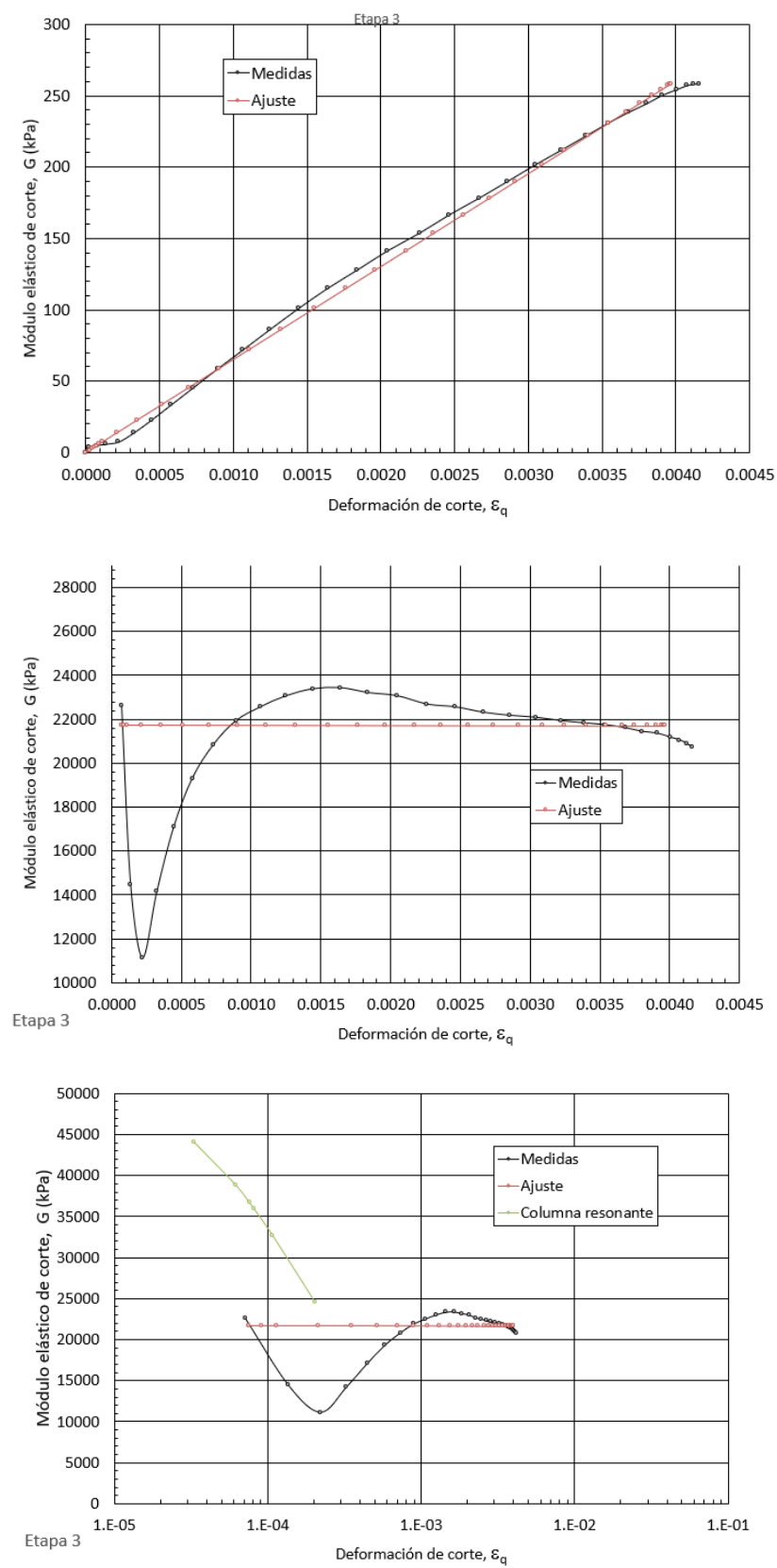


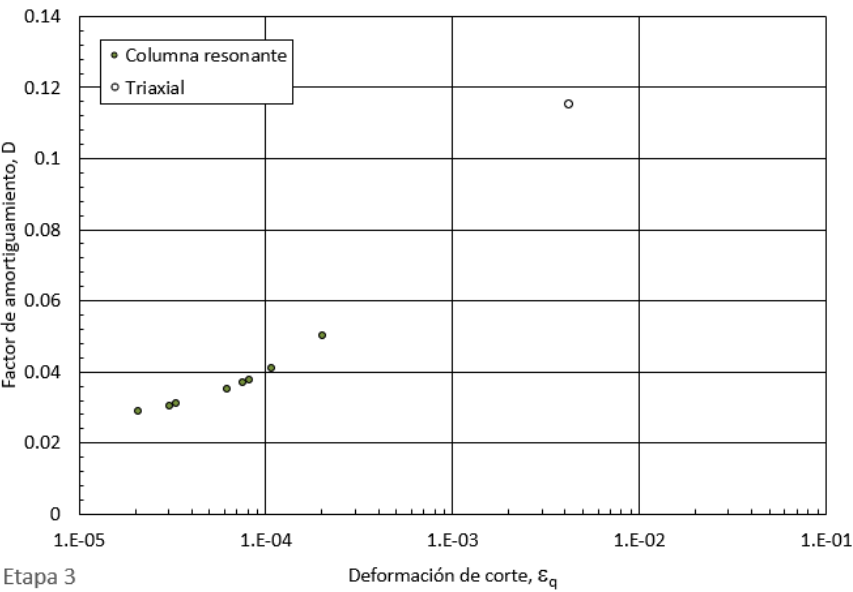
12.2. Anexo muestra 2



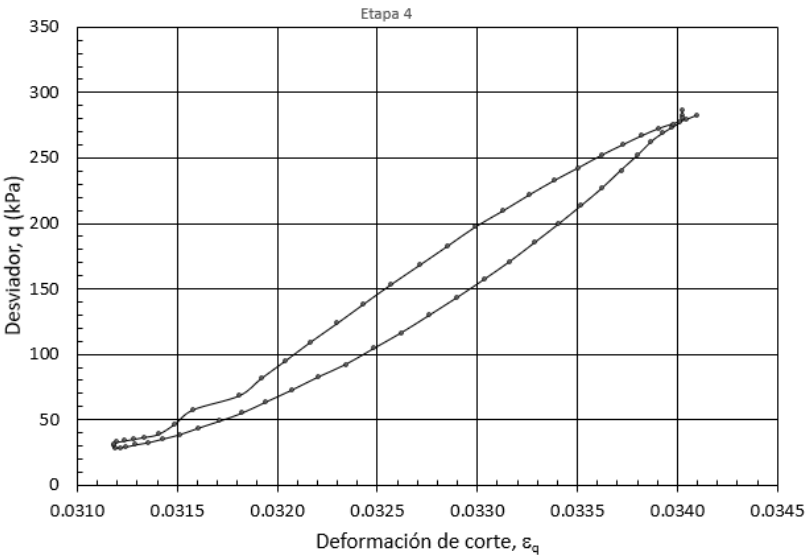
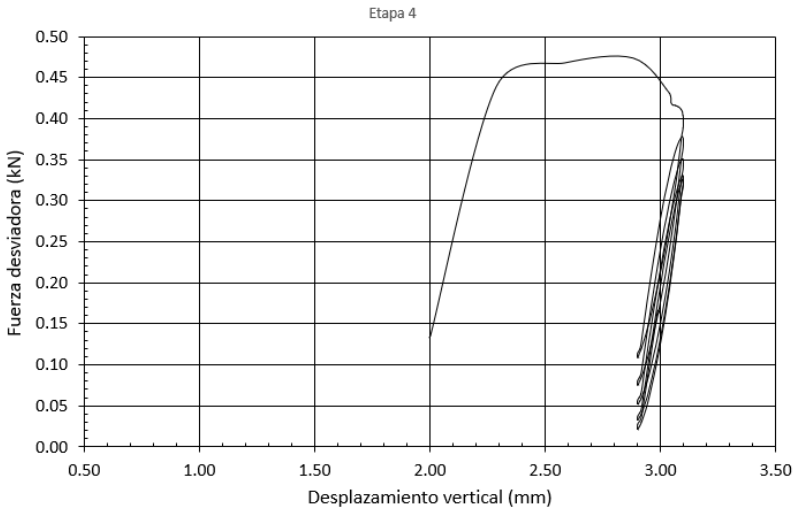
Etapa 3

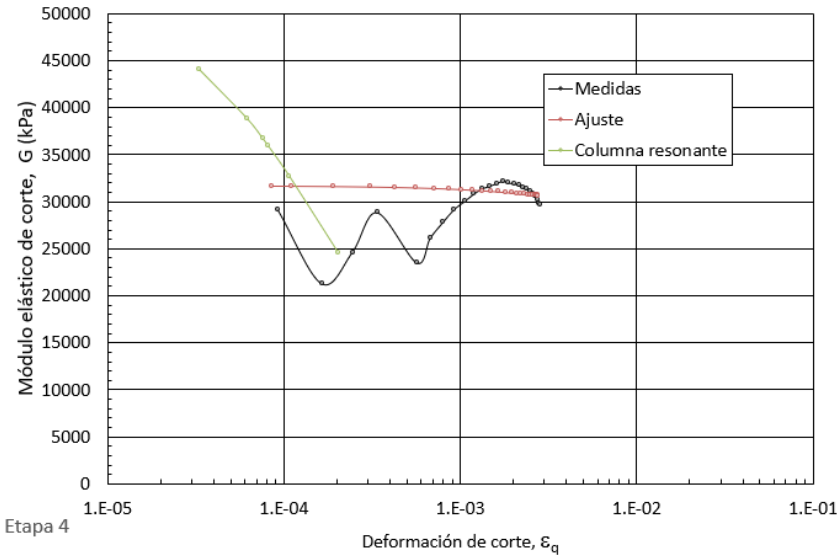
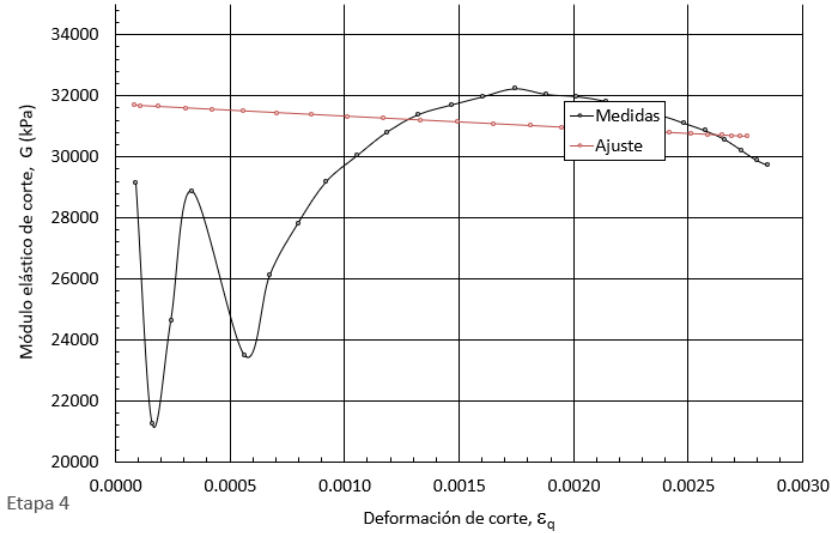
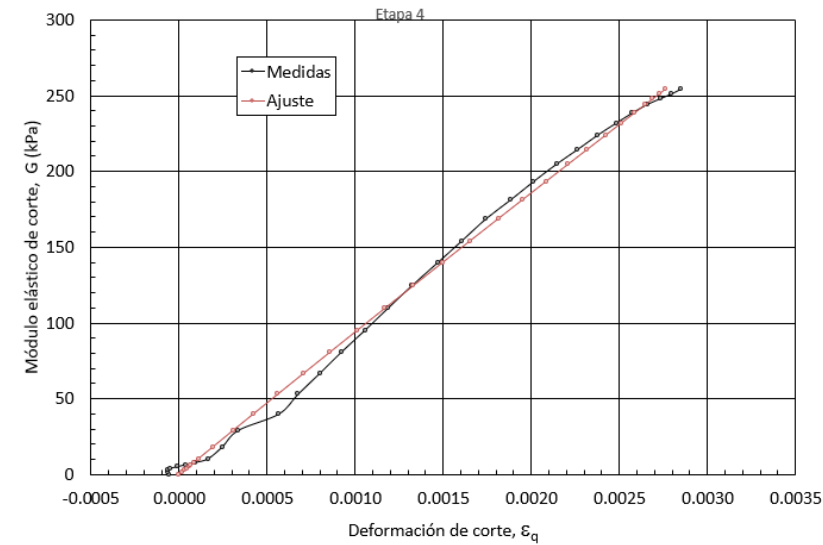


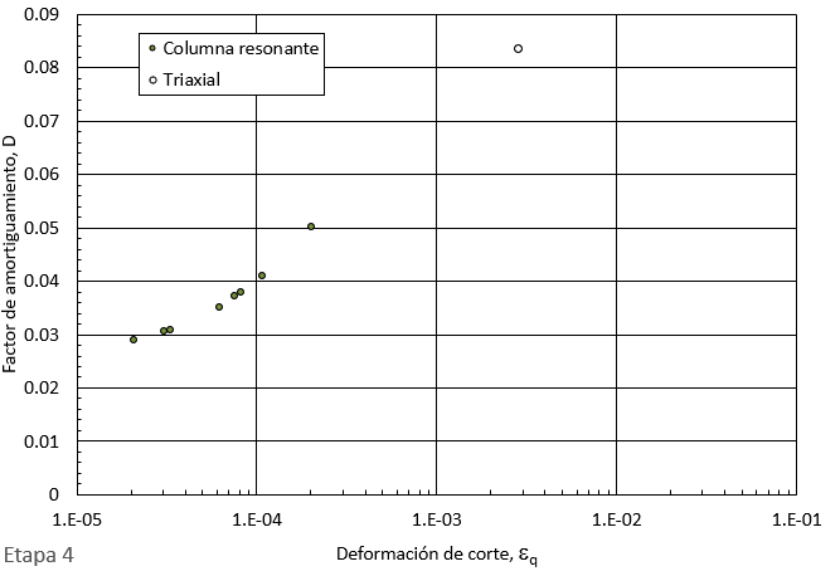




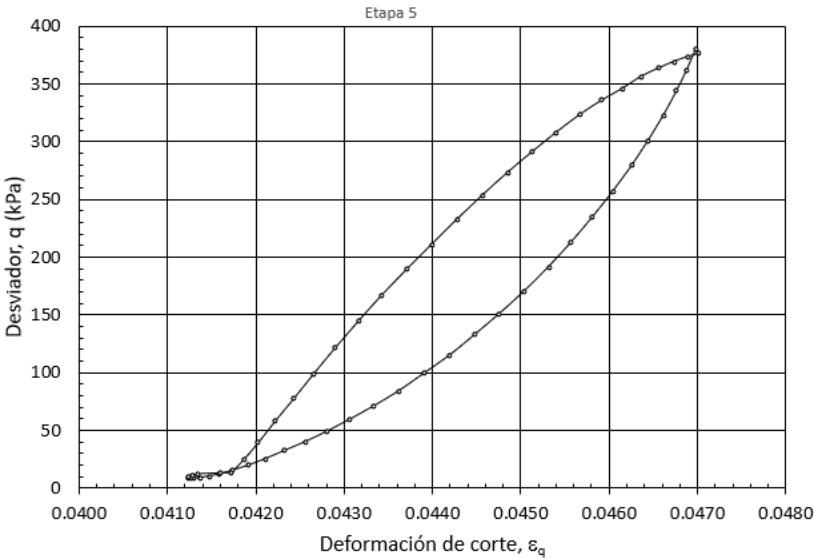
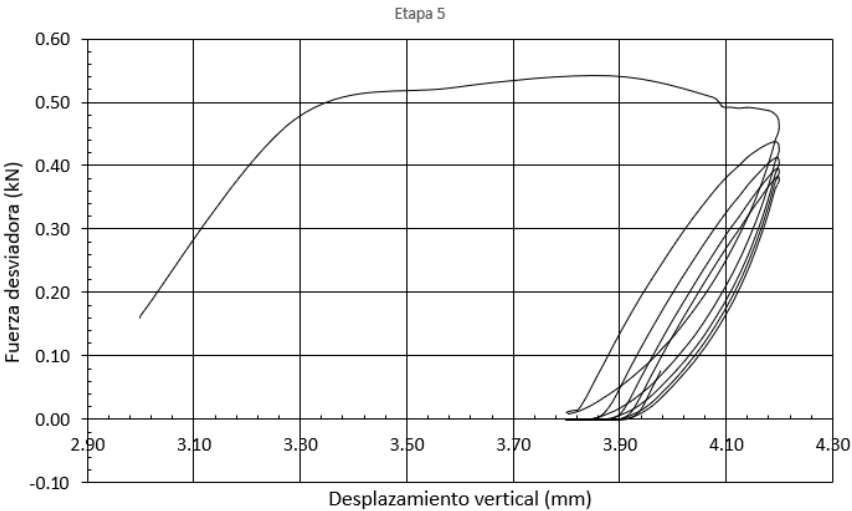
Etapa 4

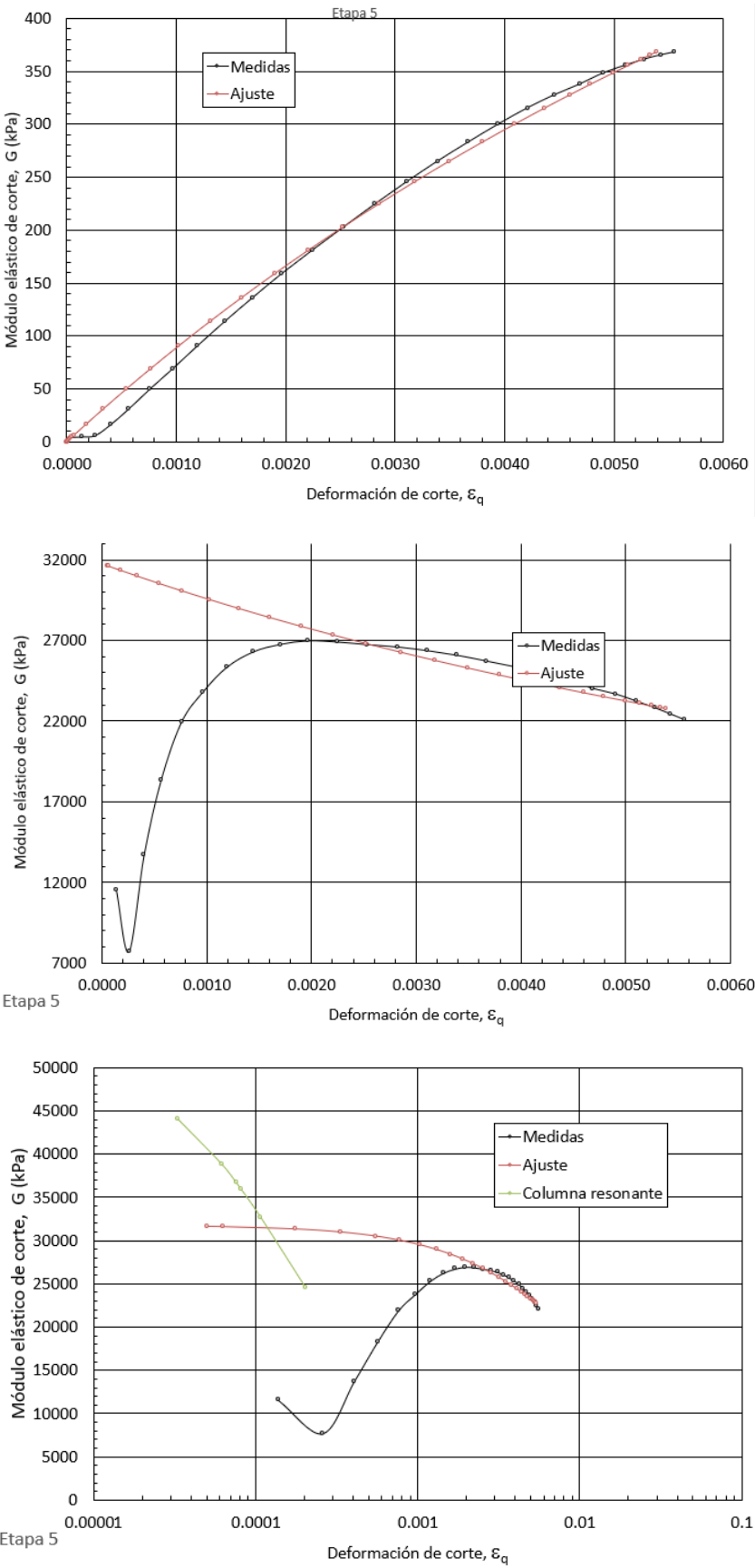


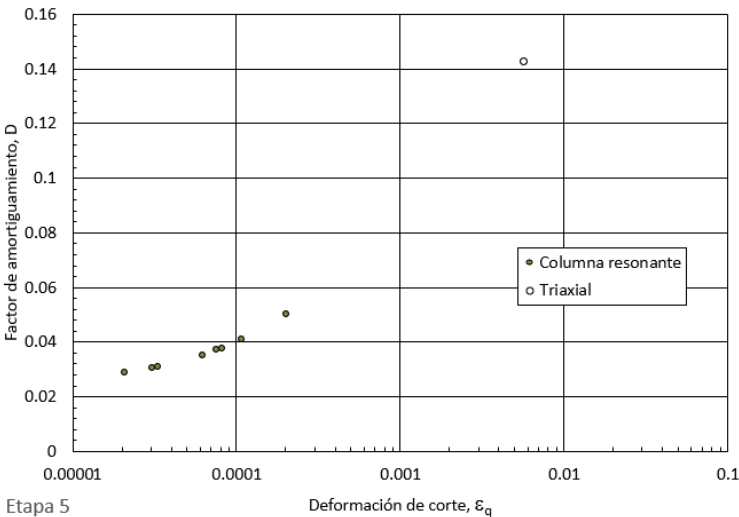




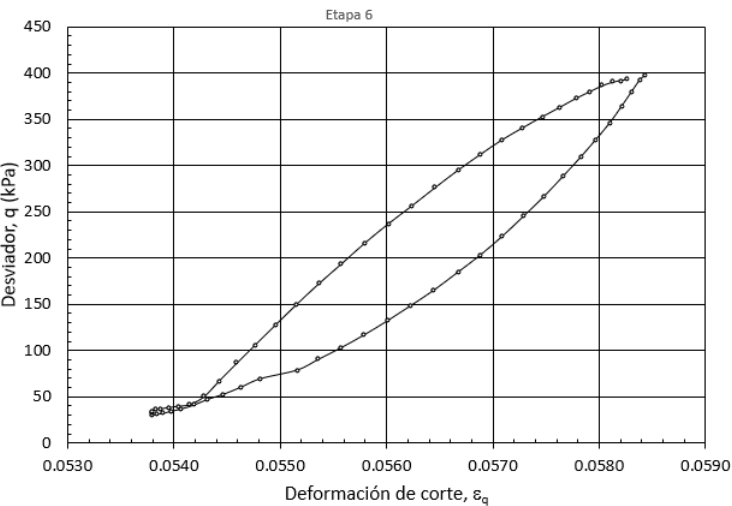
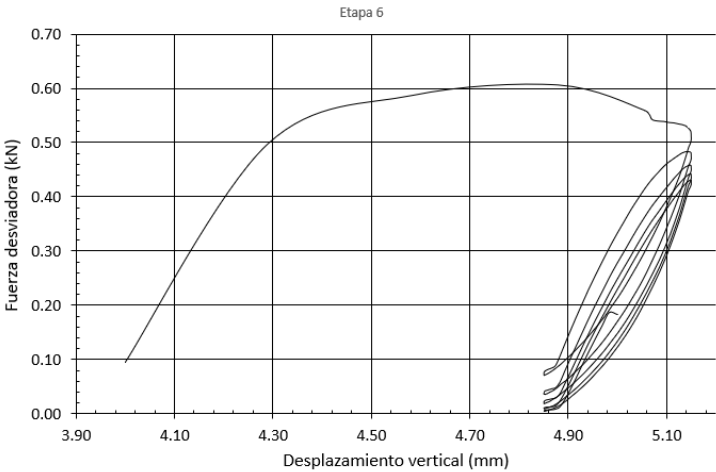
Etapa 5

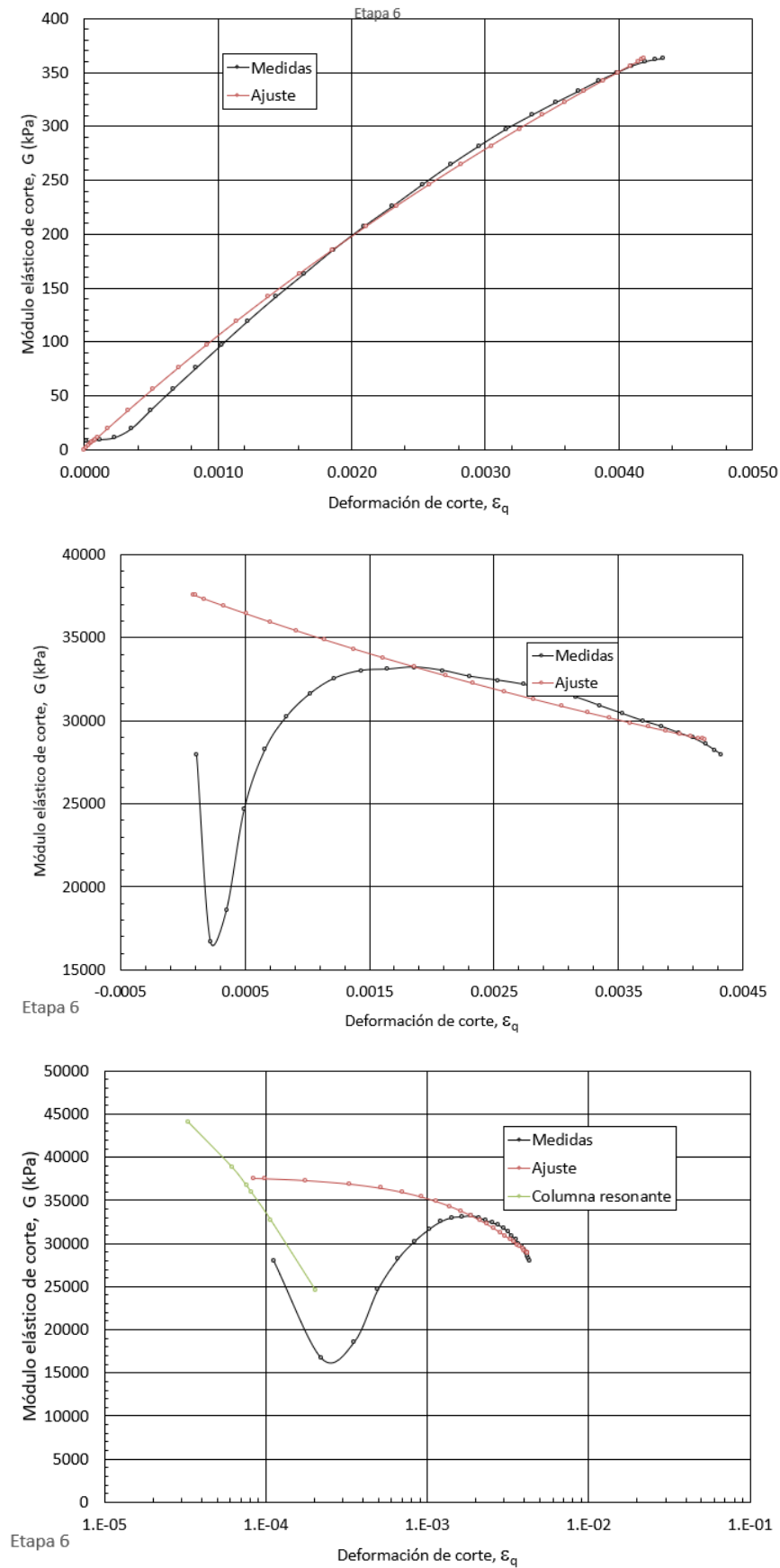


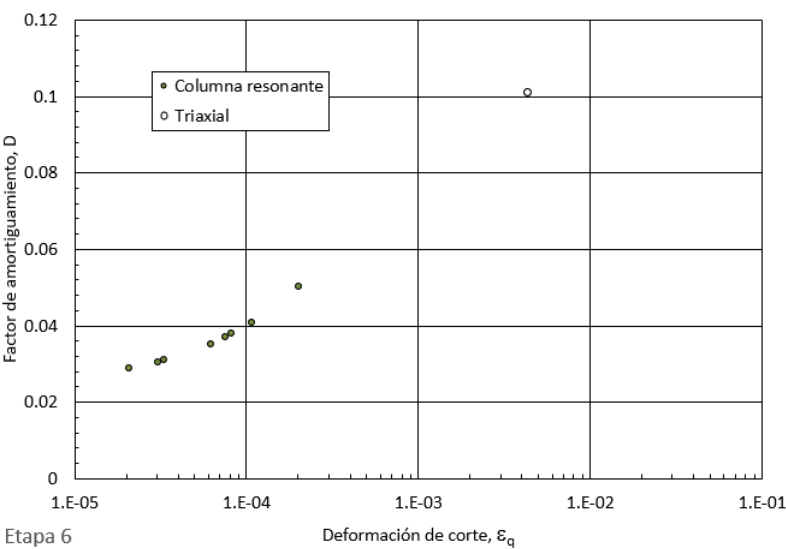




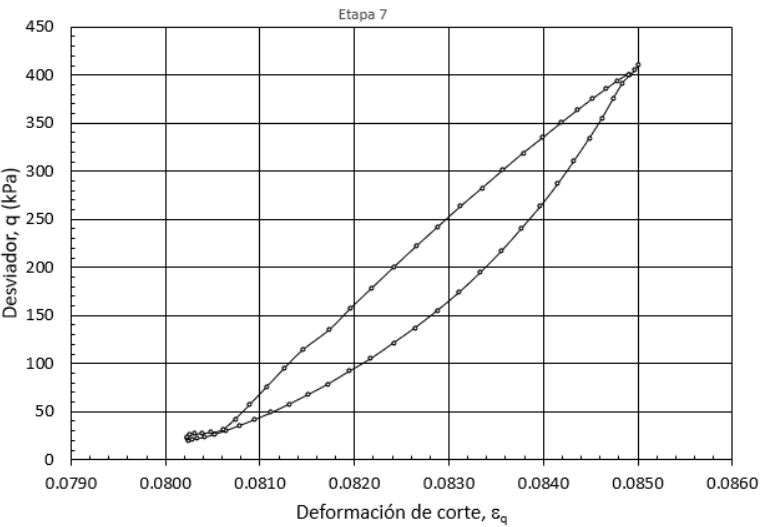
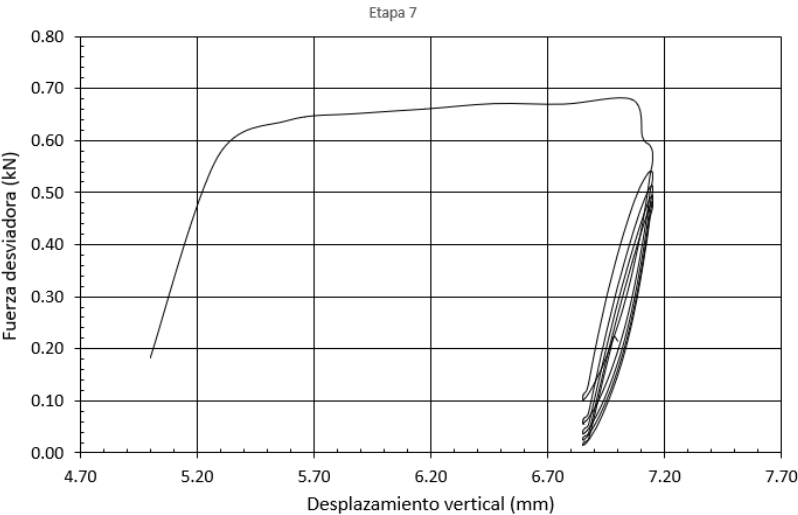
Etapa 6

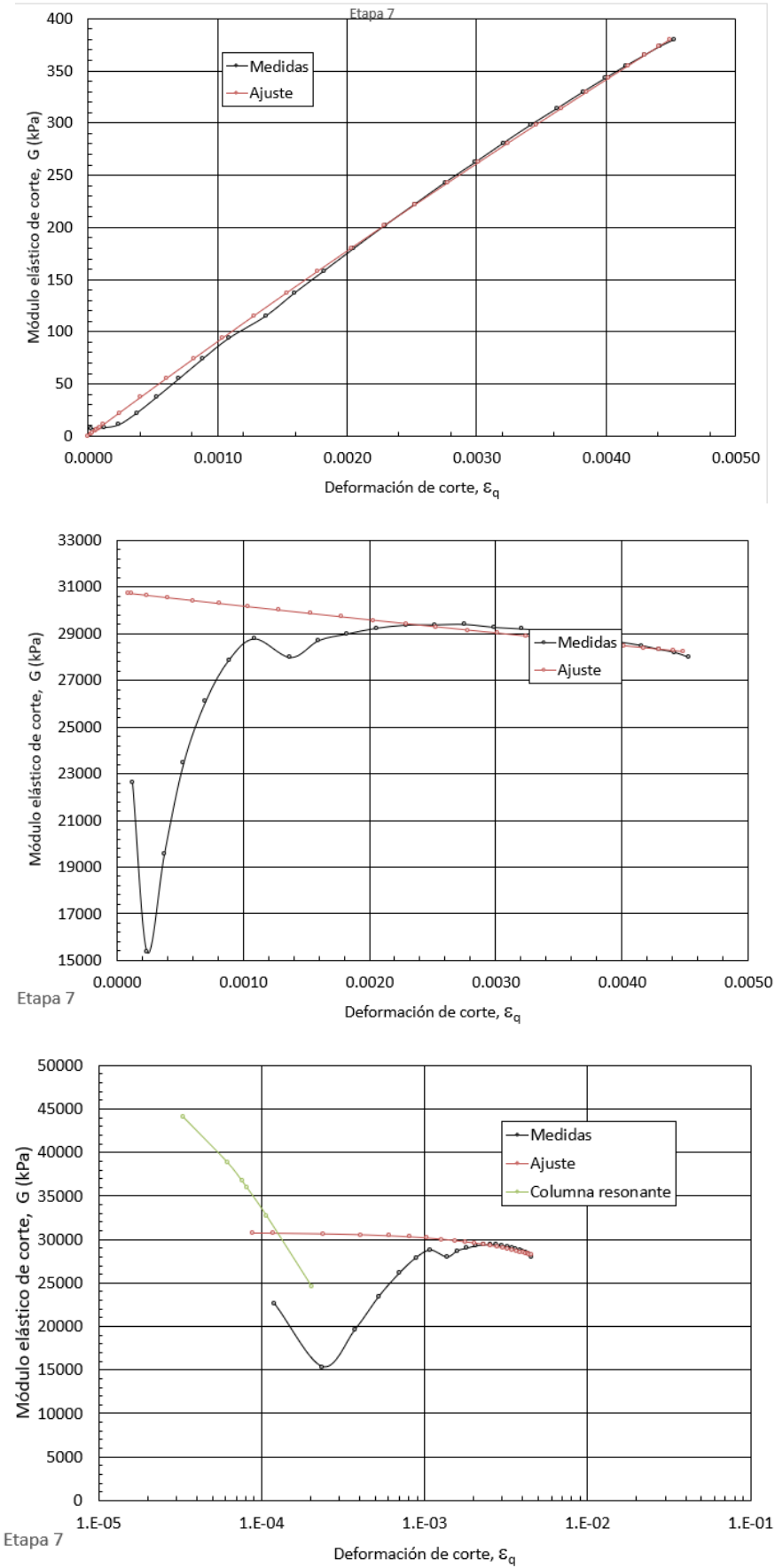


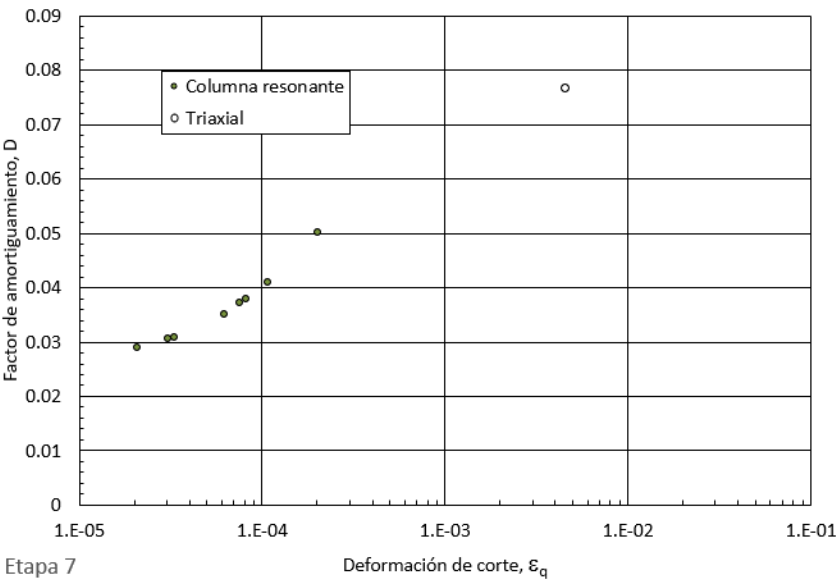




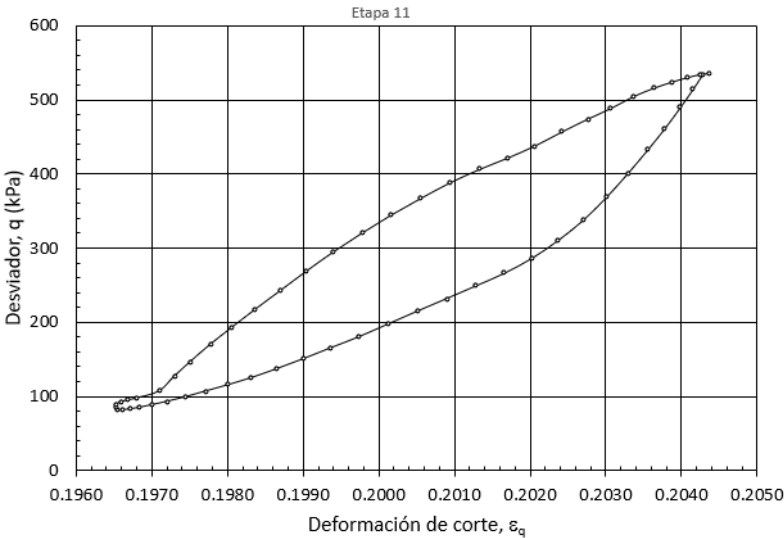
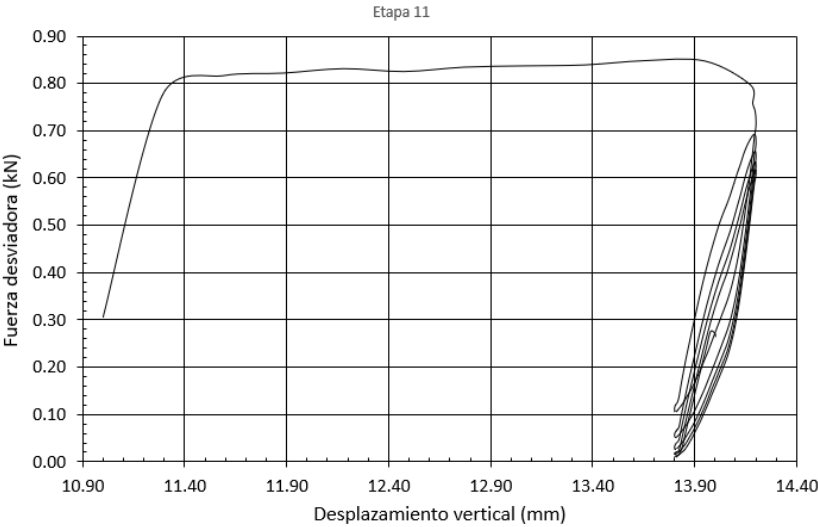
Etapa7

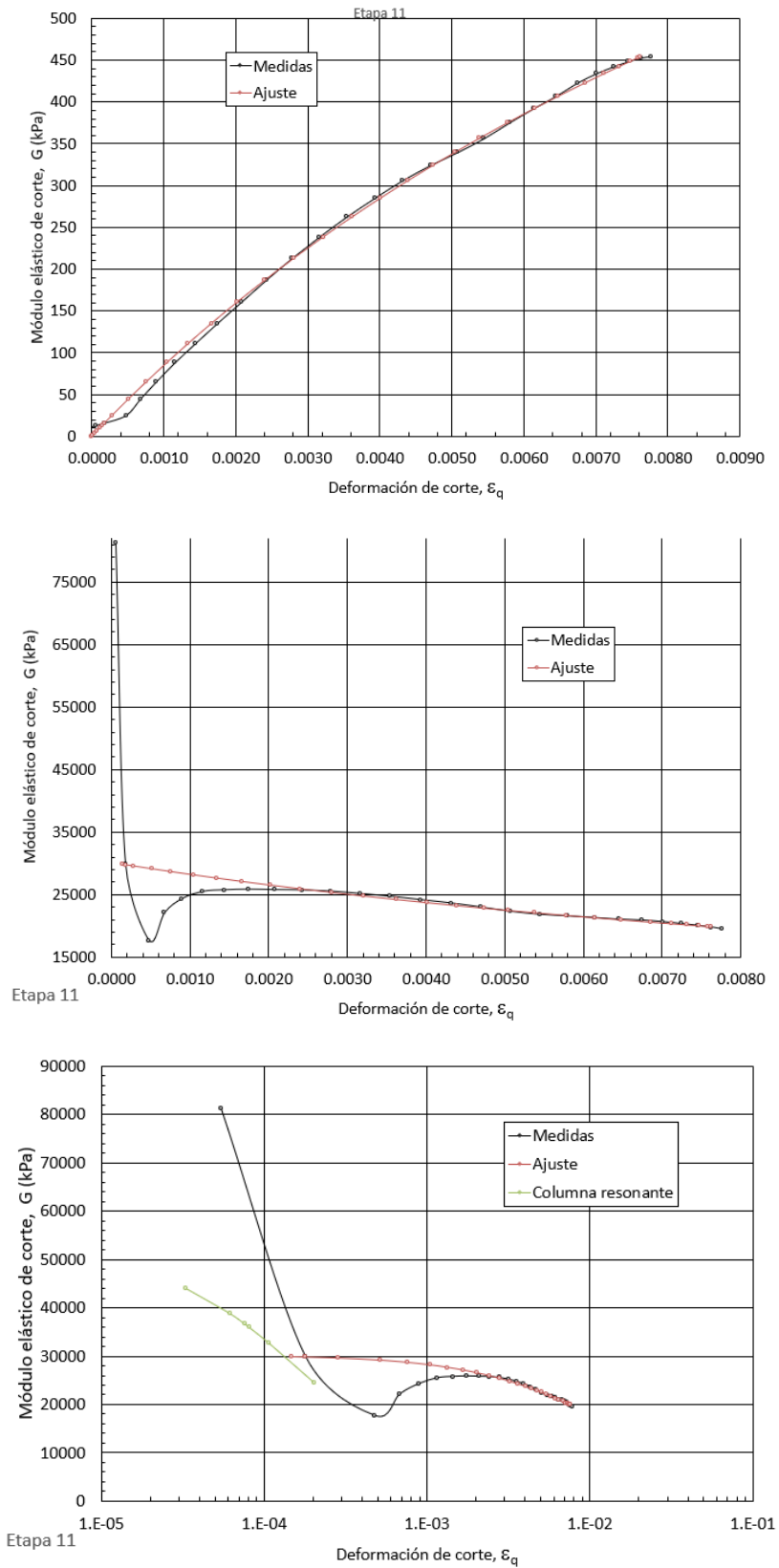


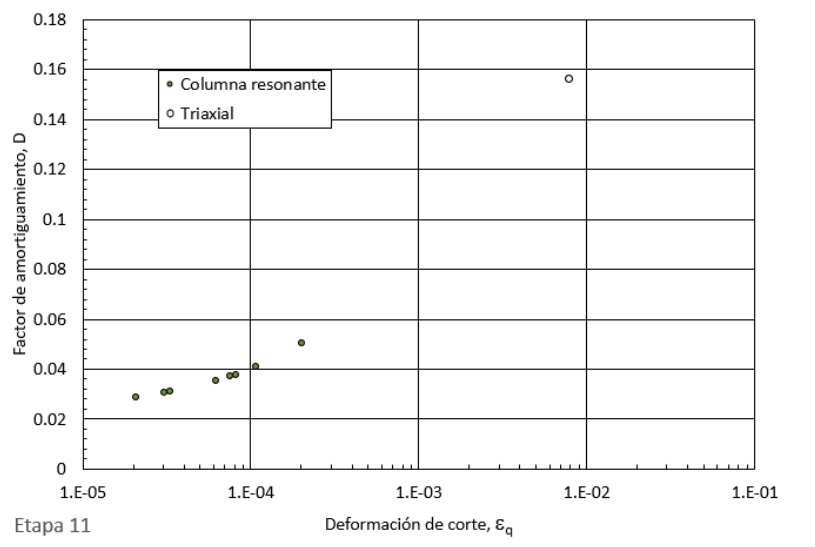




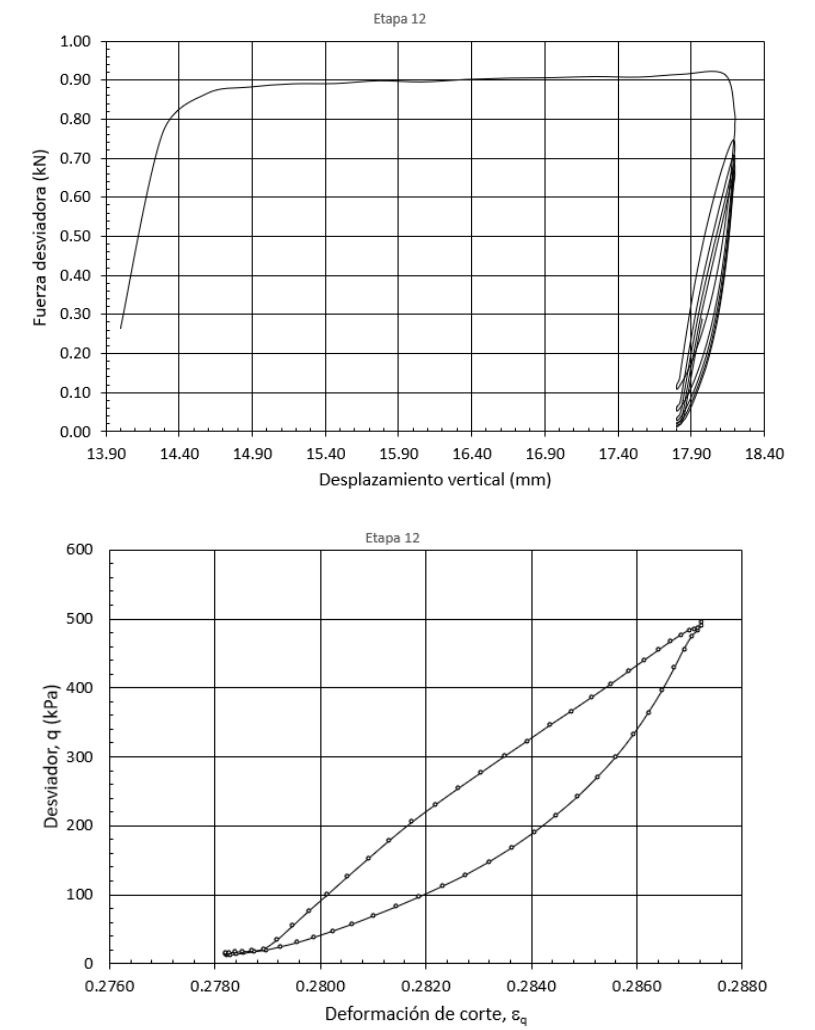
Etapa 11

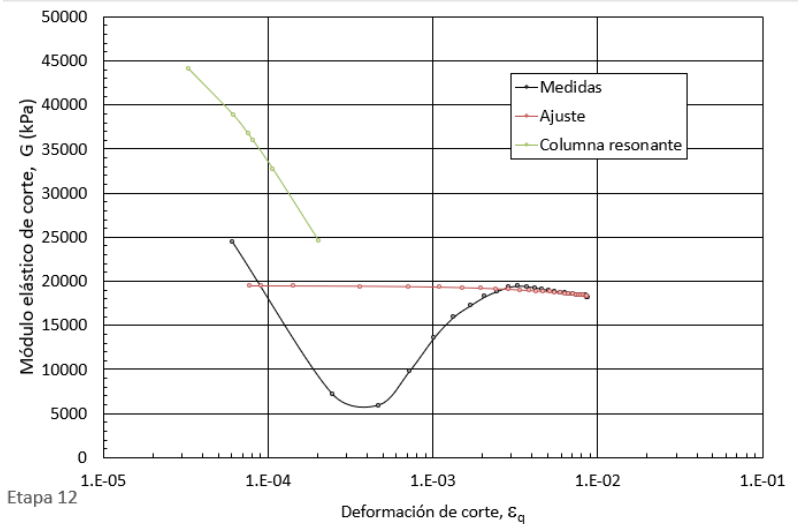
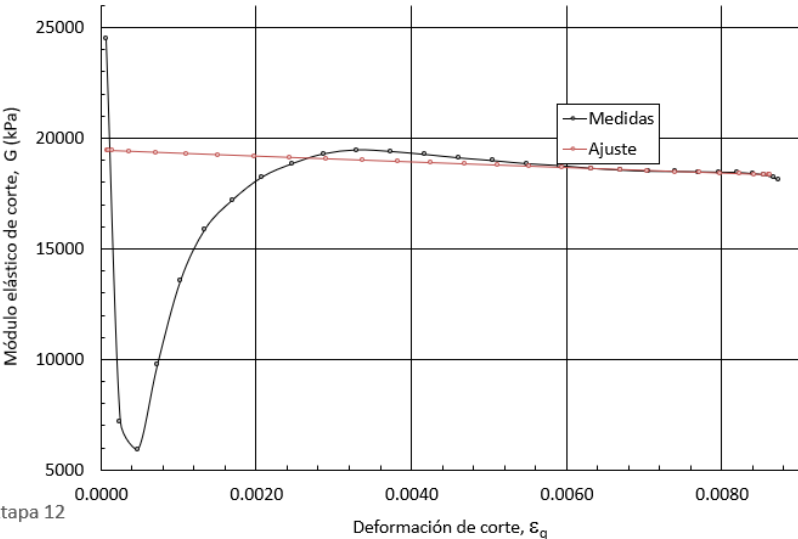
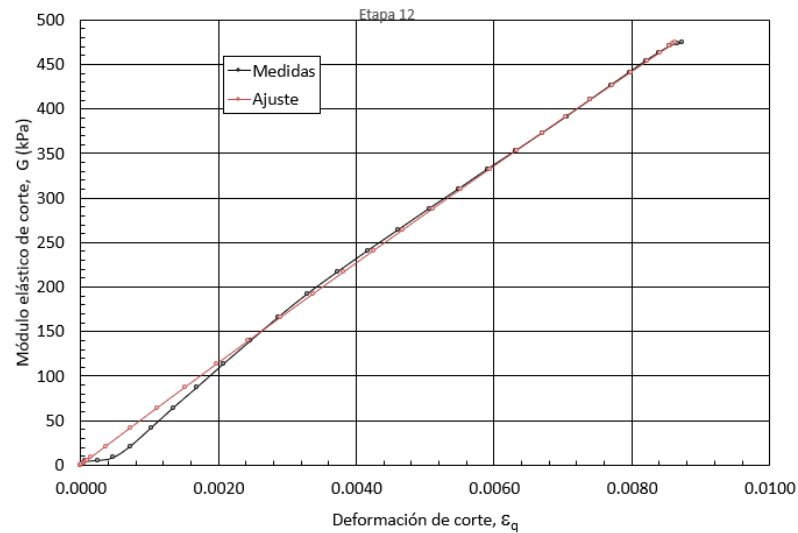


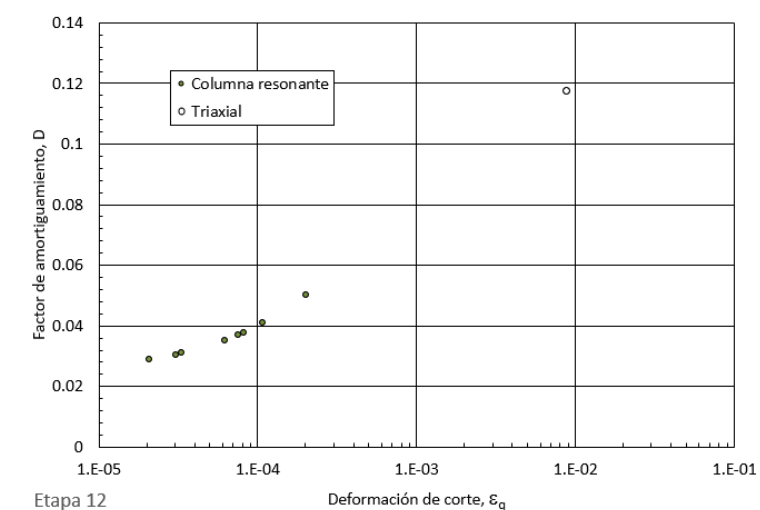




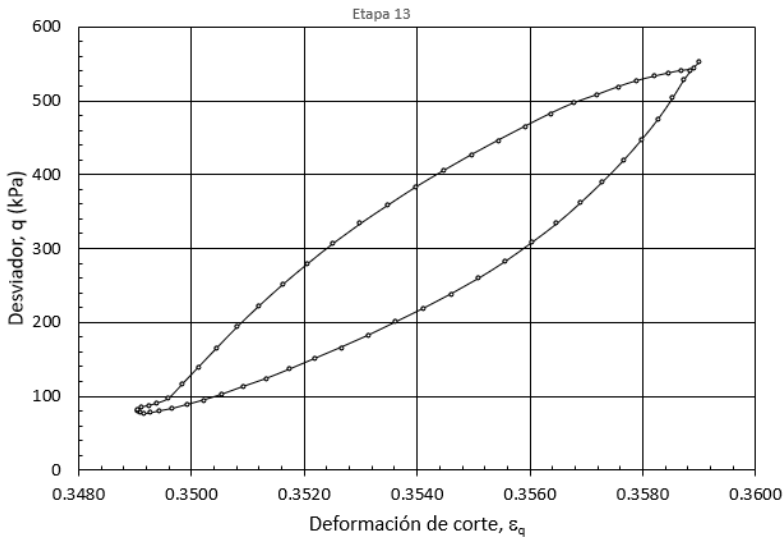
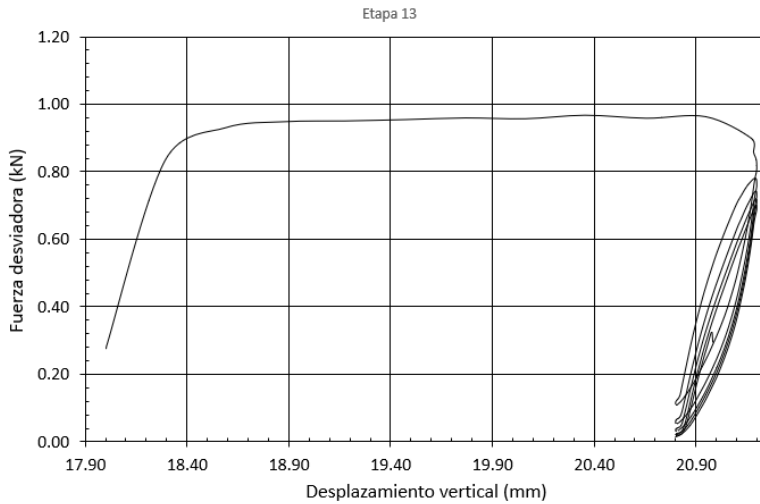
Etapa 12

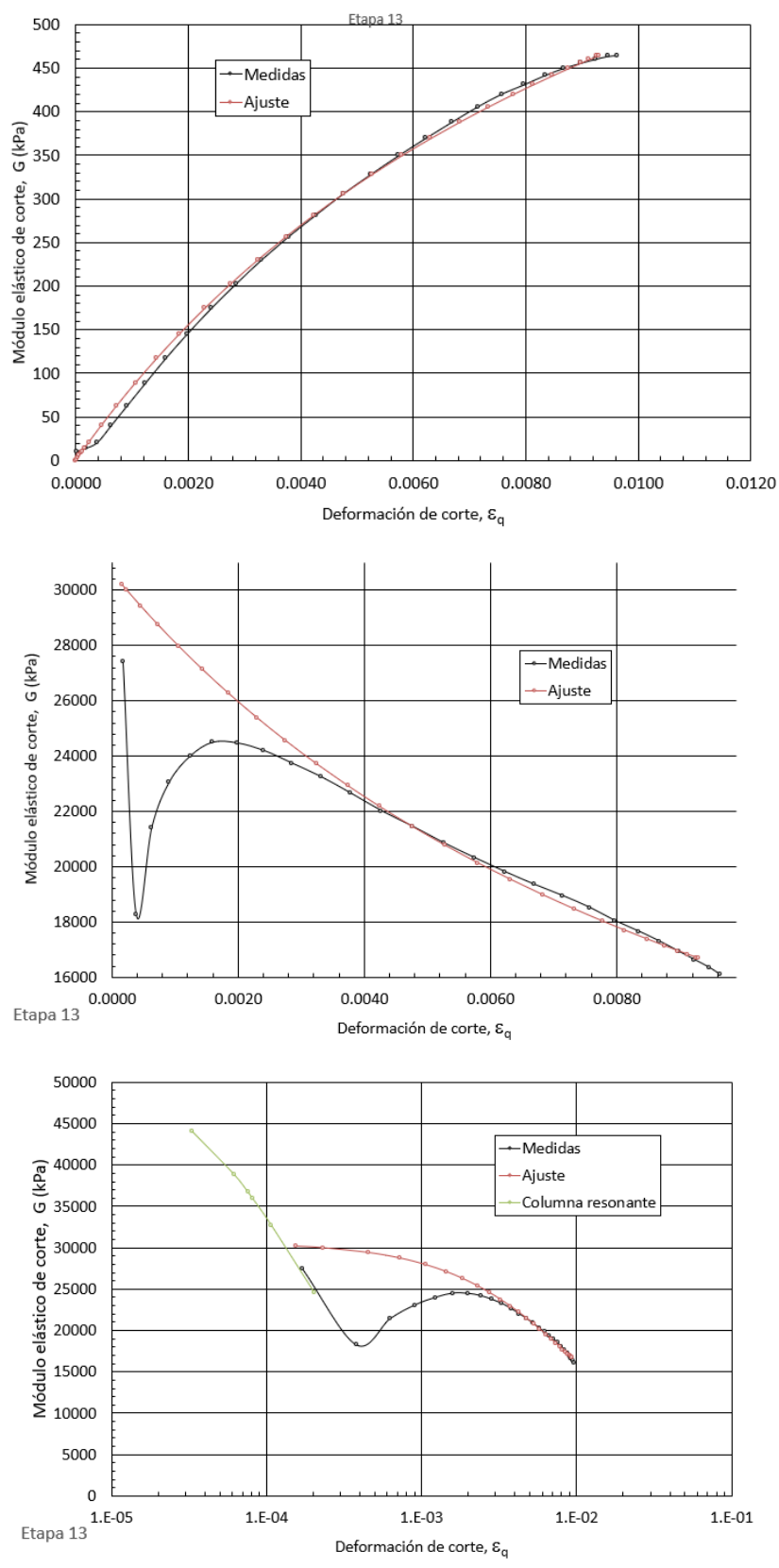


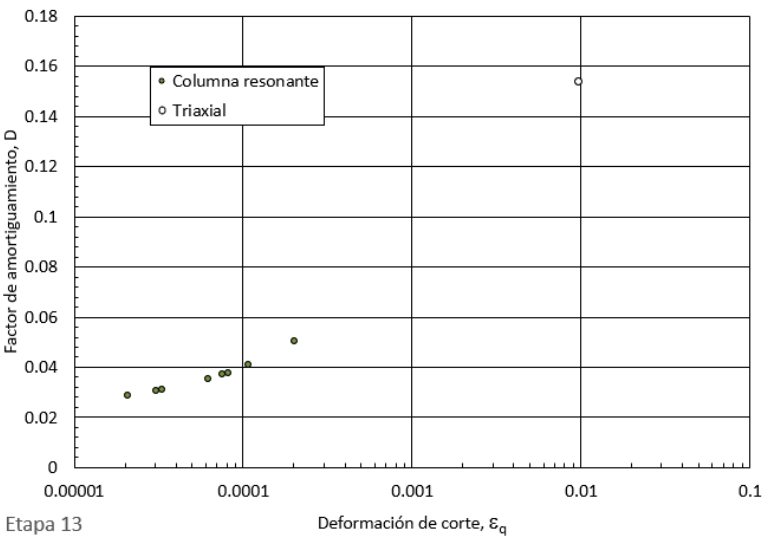




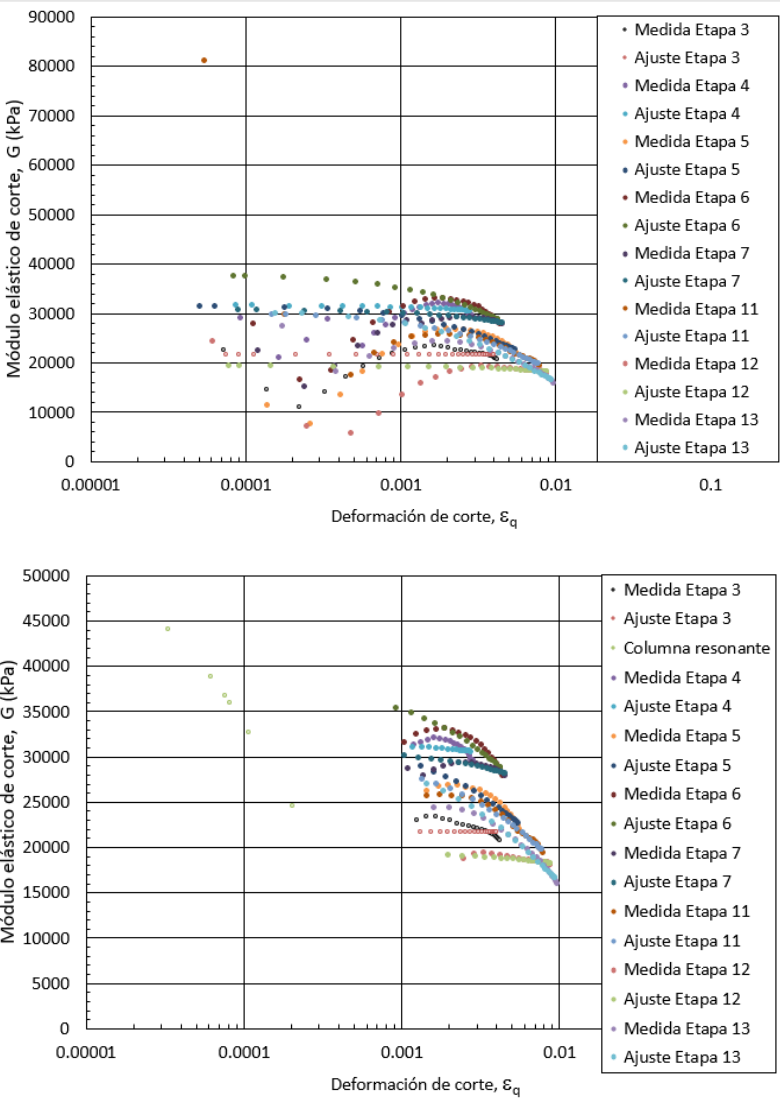
Etapa 13

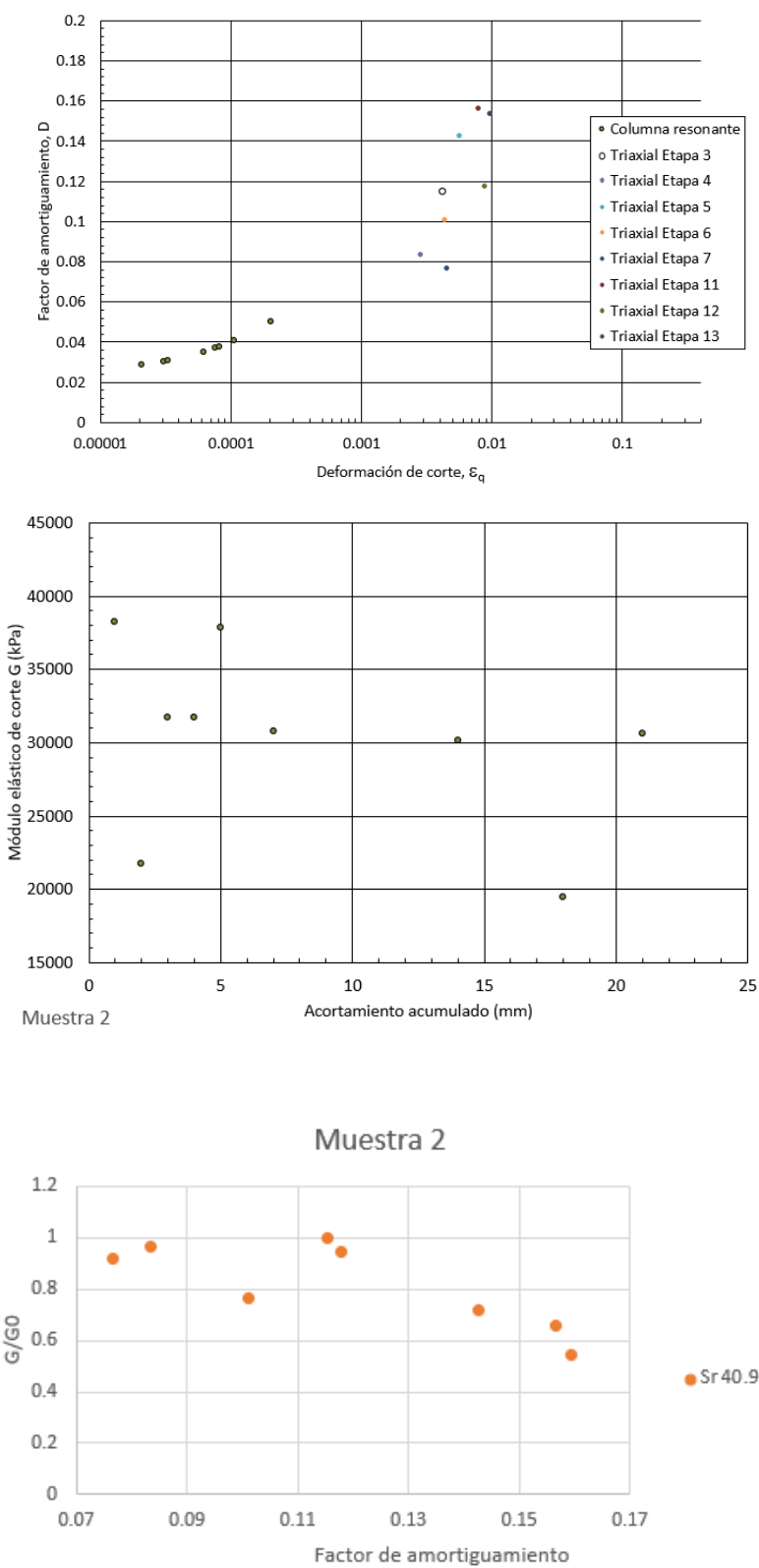




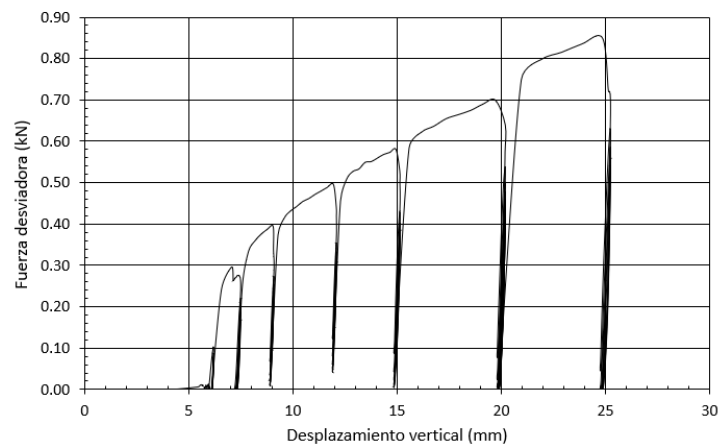


Todas las etapas

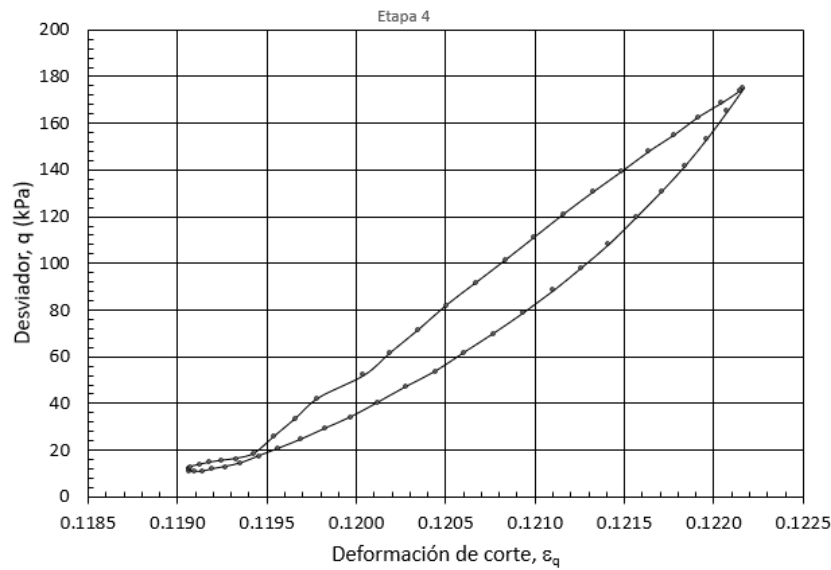
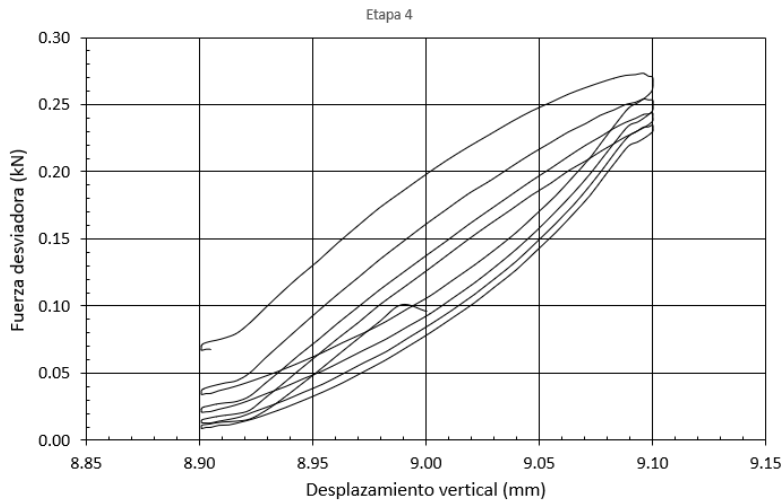


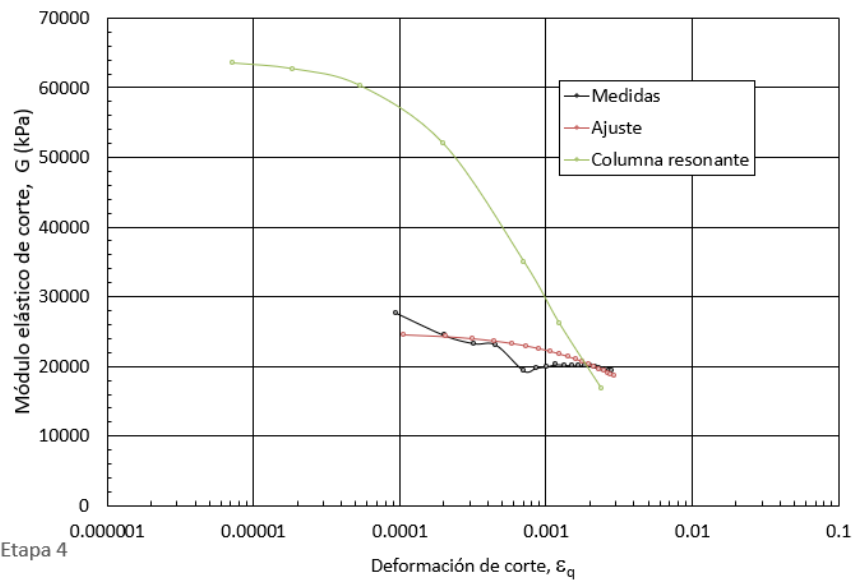
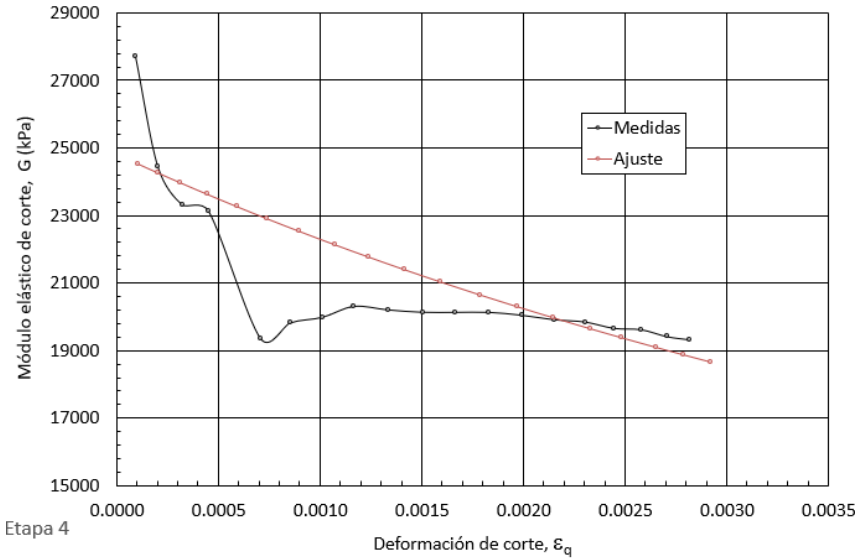
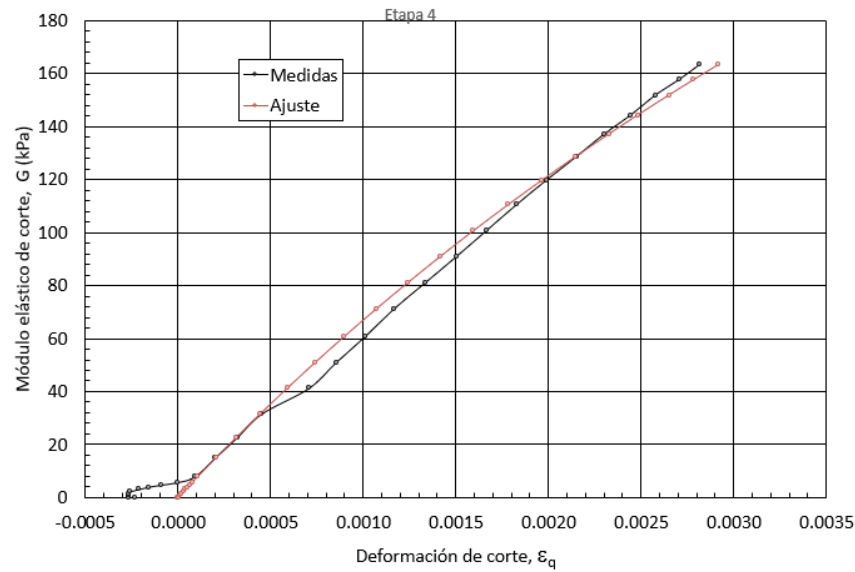


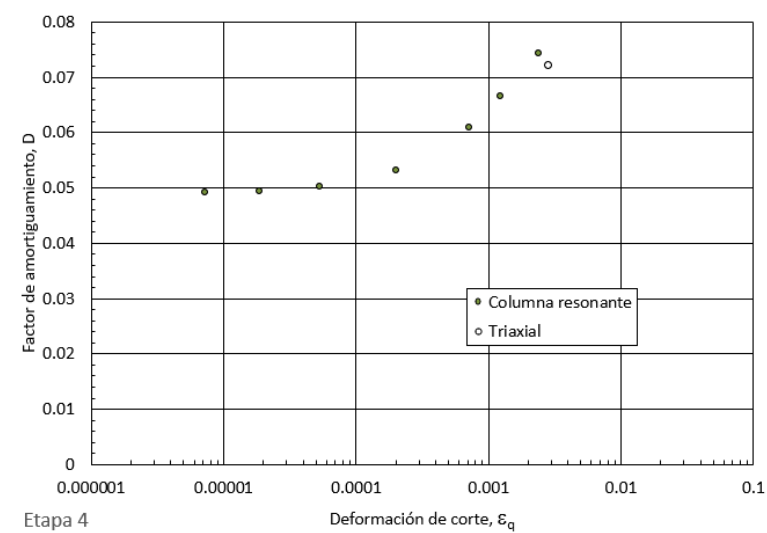
12.3. Anexo muestra 3



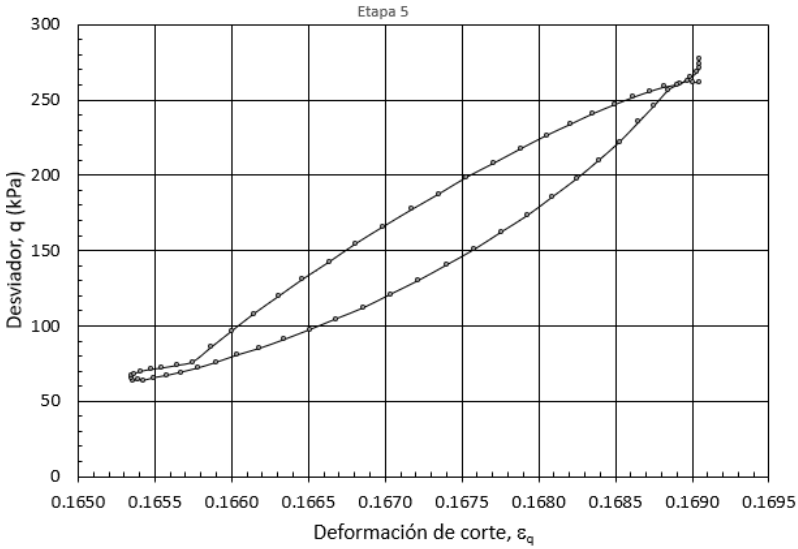
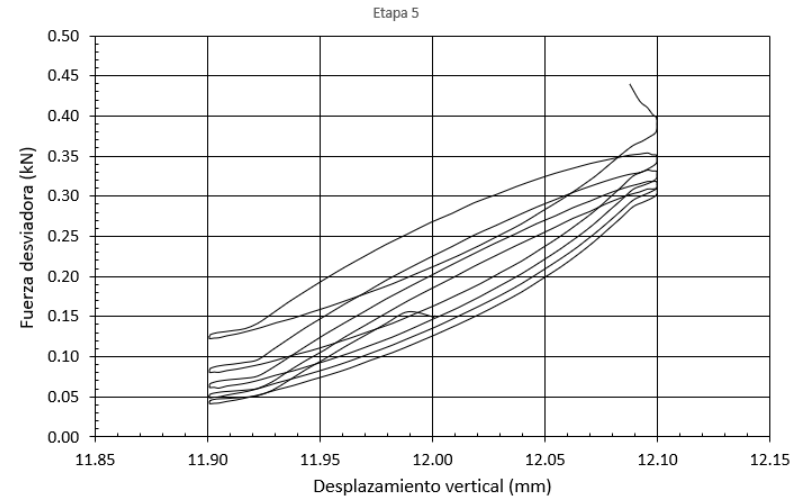
Etapa 4

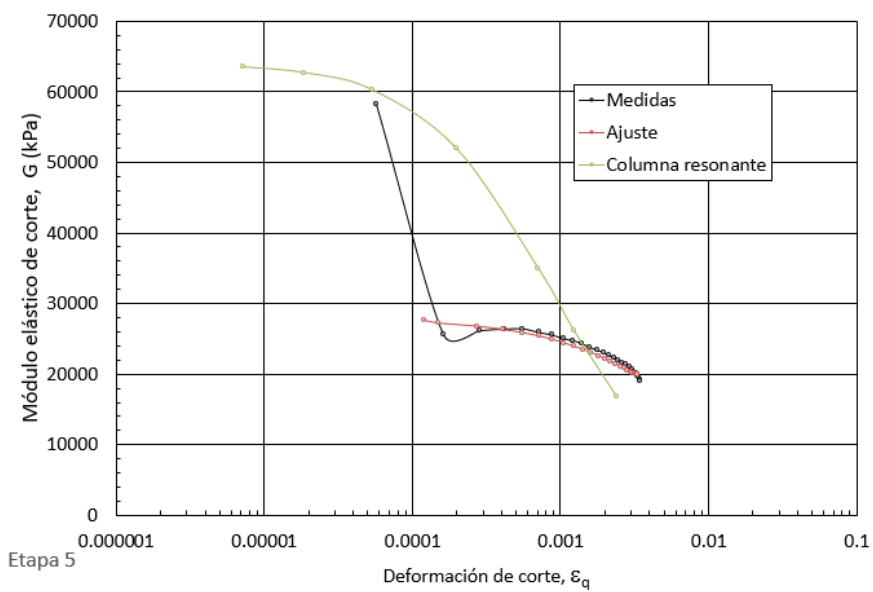
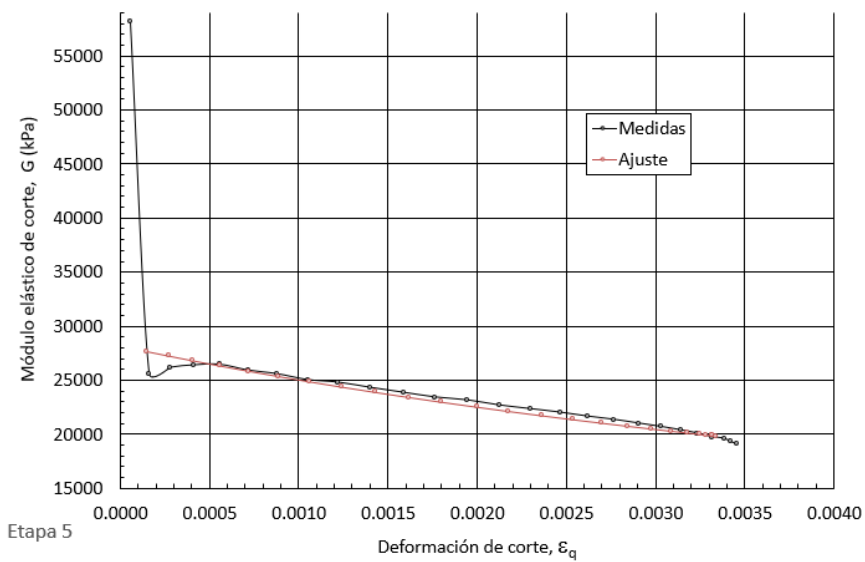
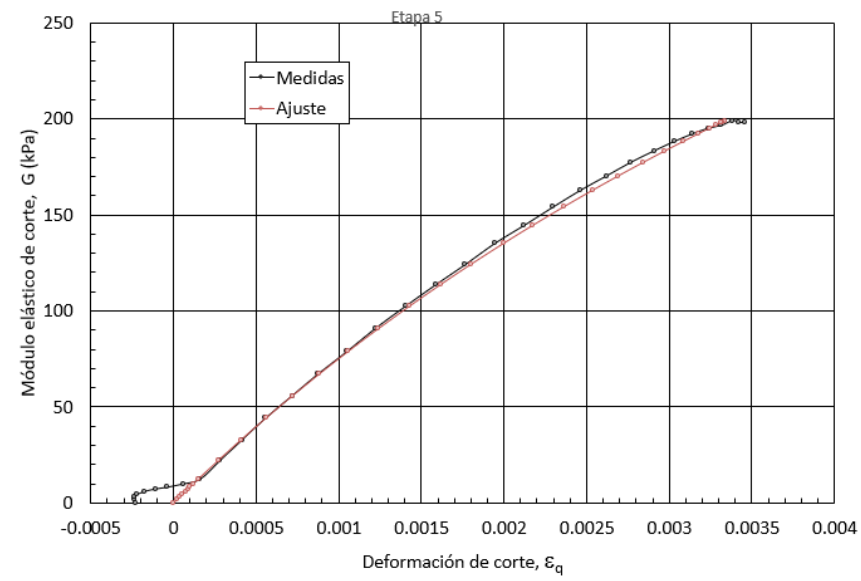


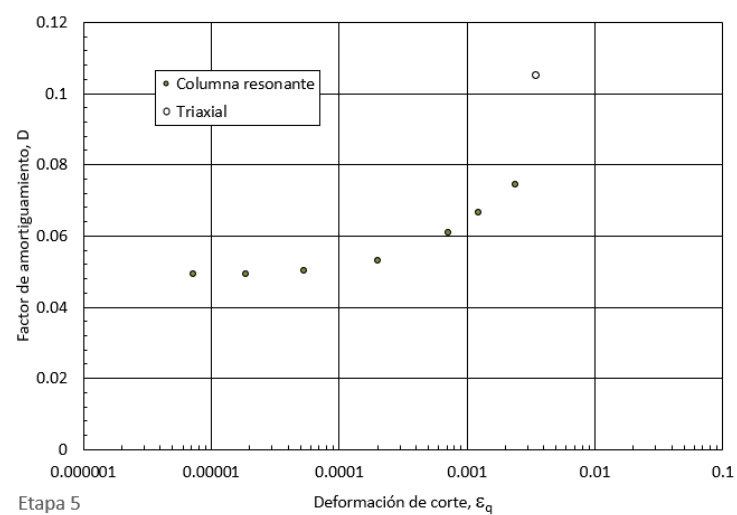




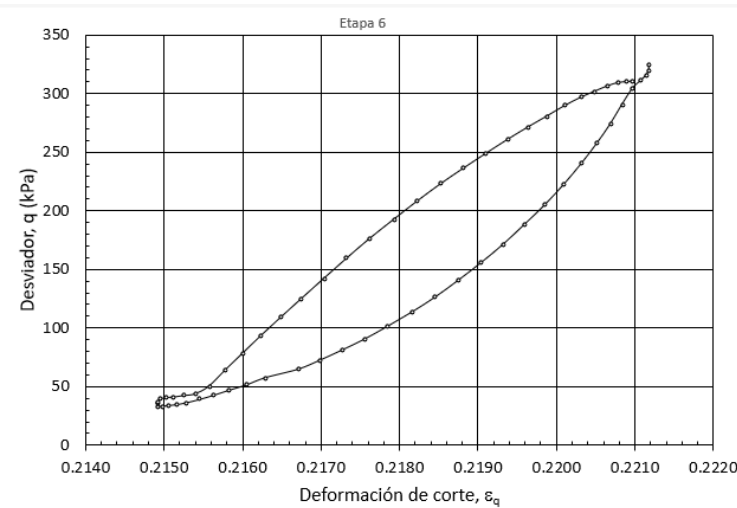
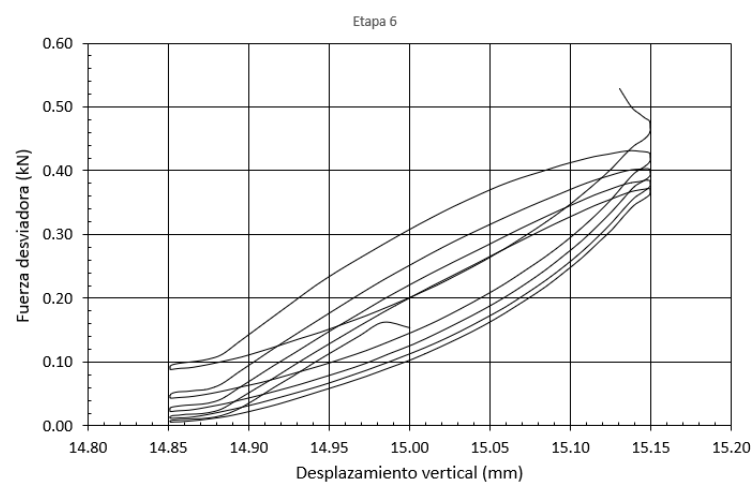
Etapa 5

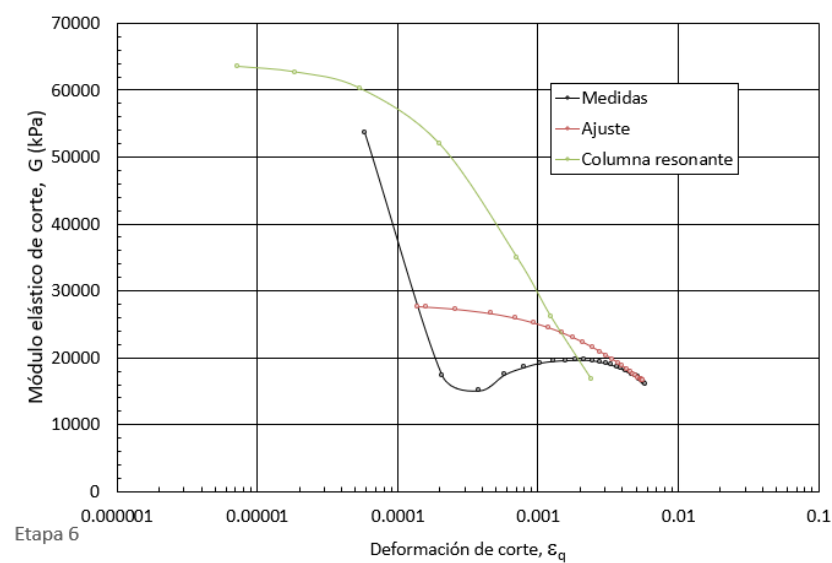
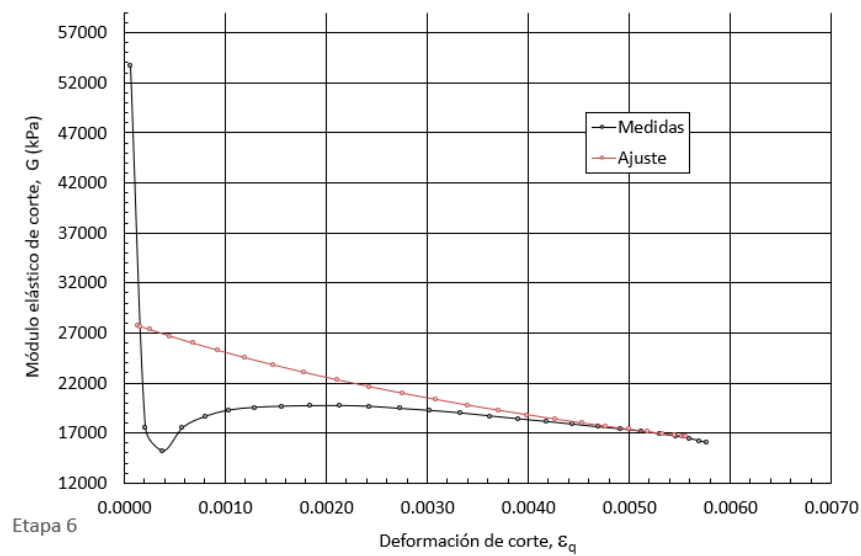
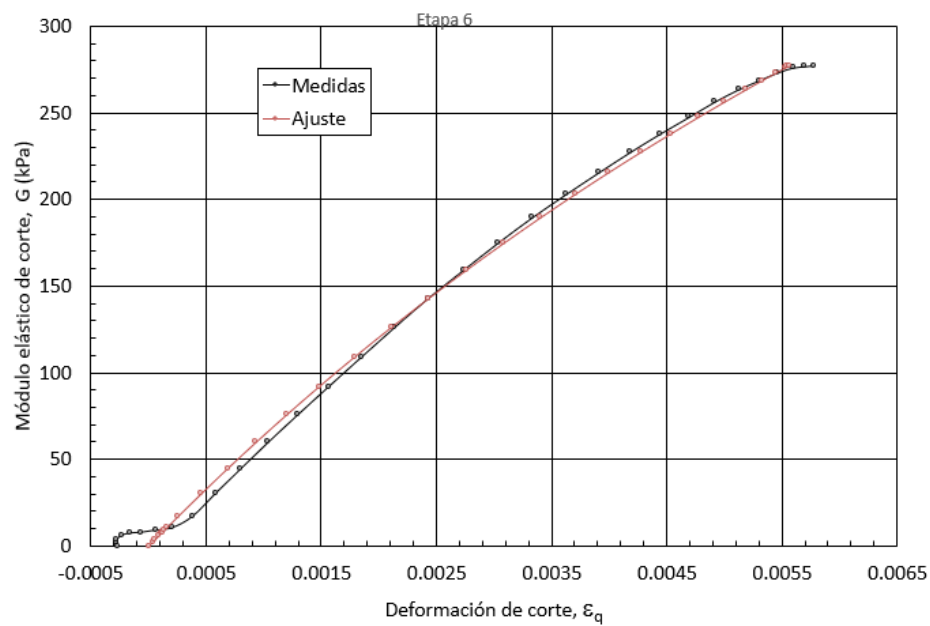


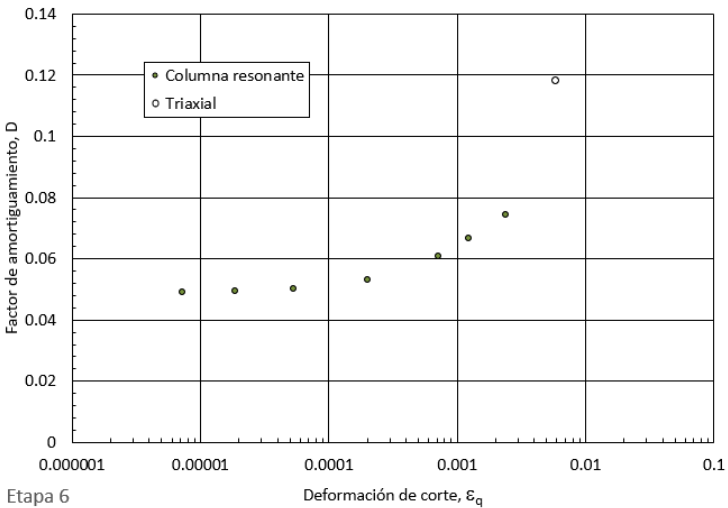




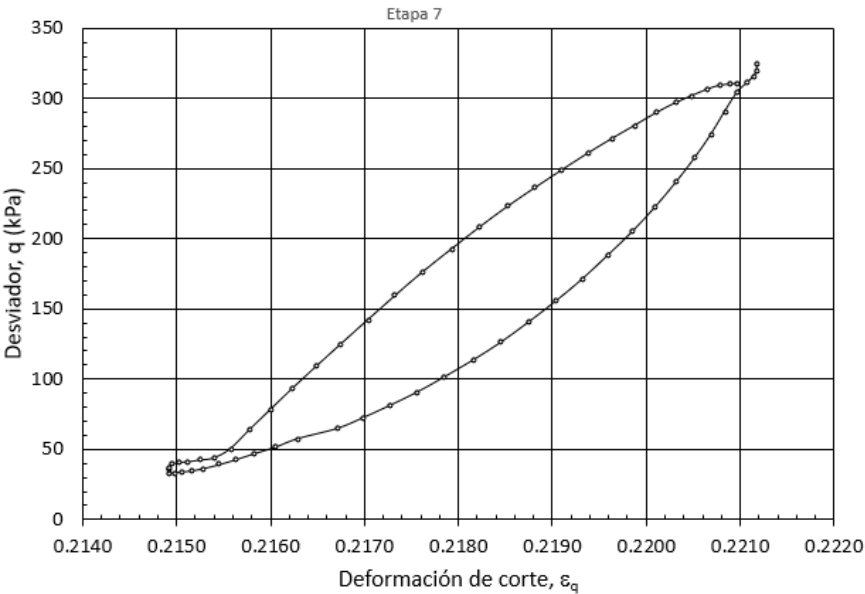
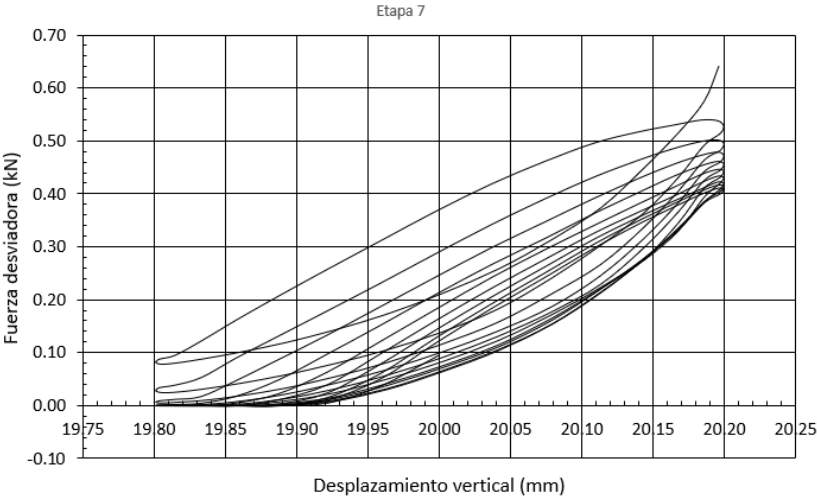
Etapa 6

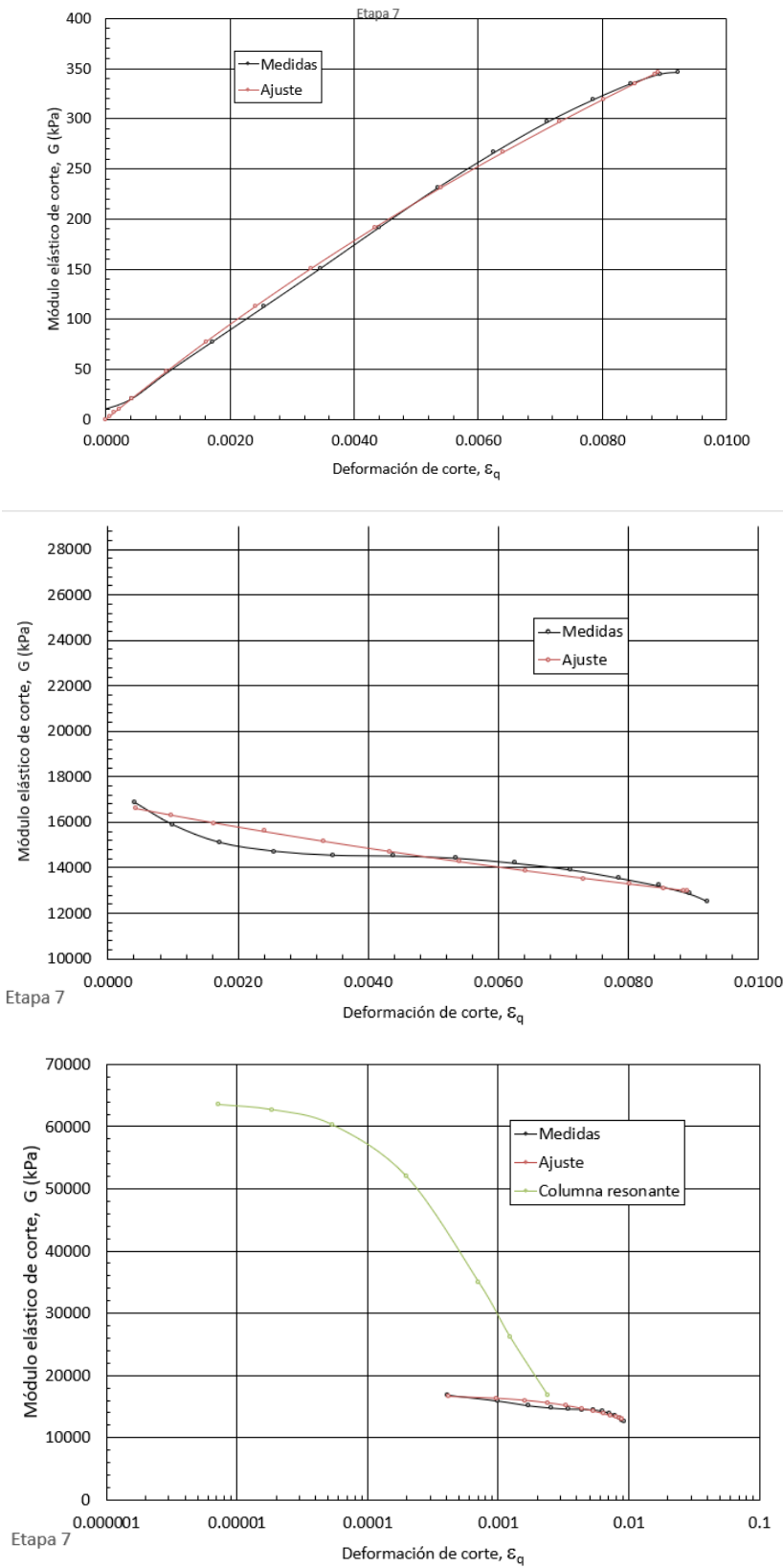


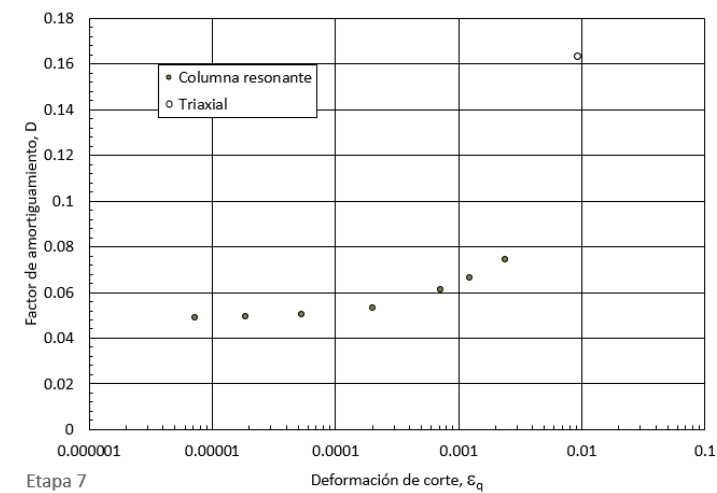




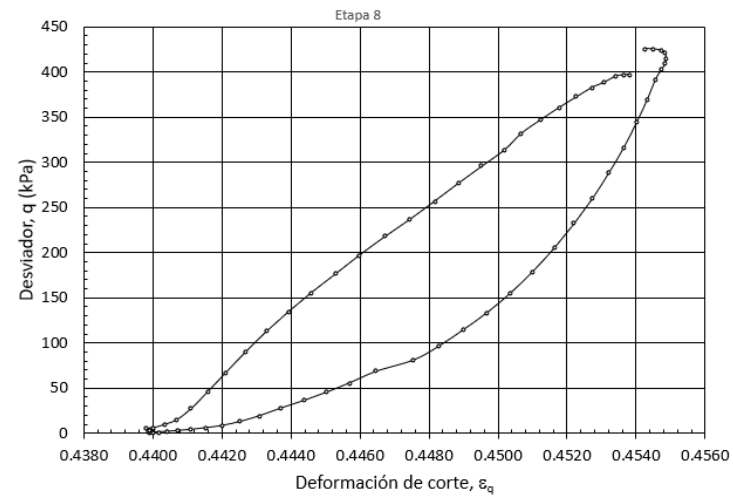
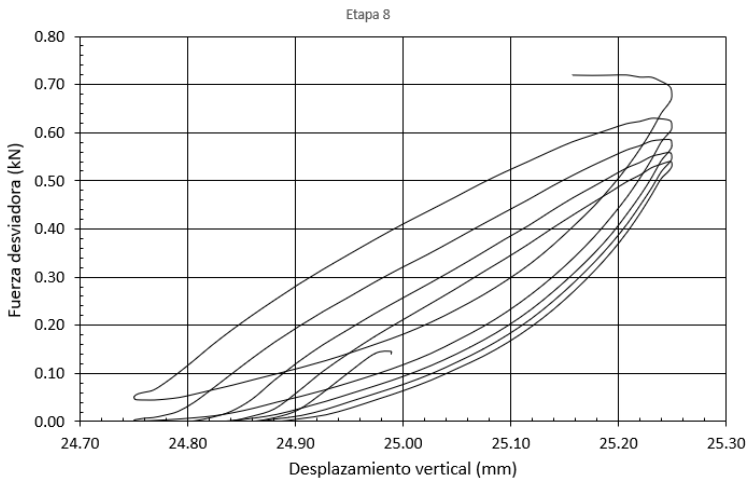
Etapa 7

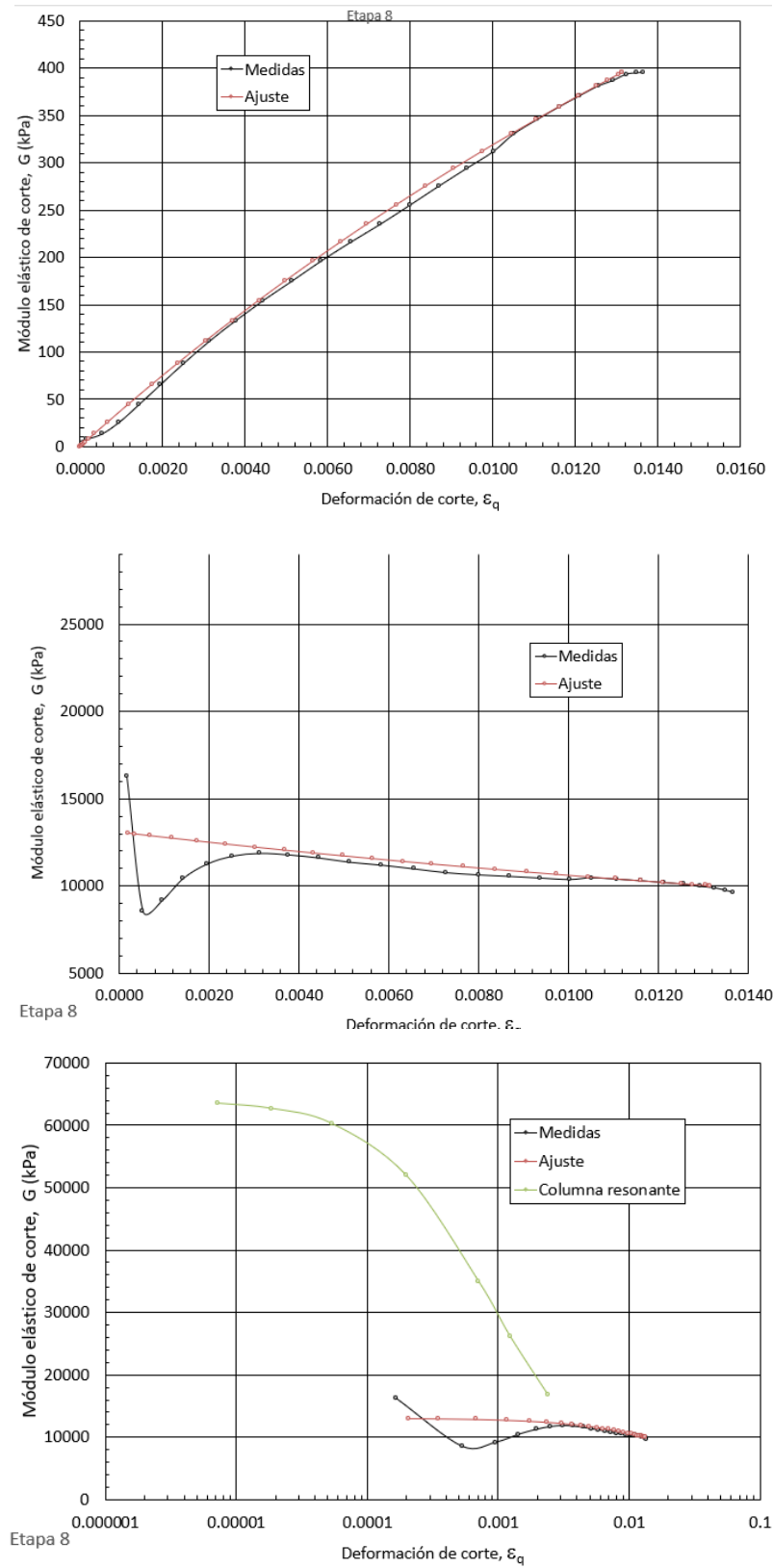


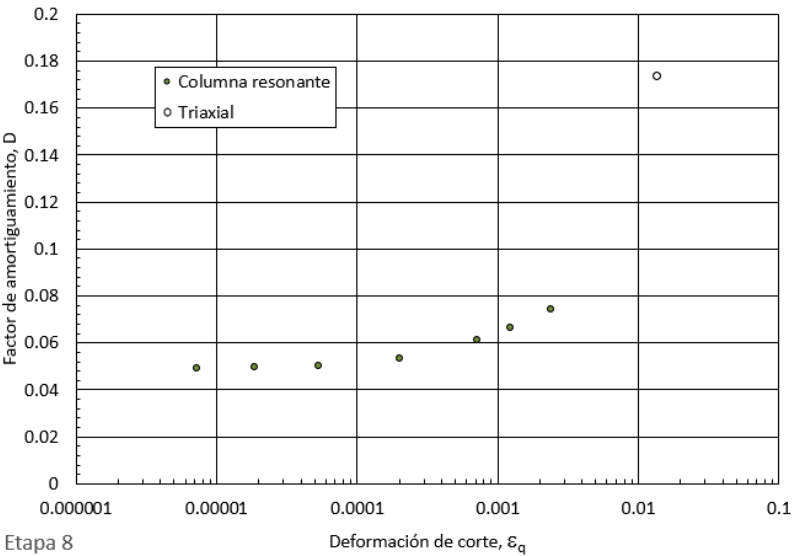




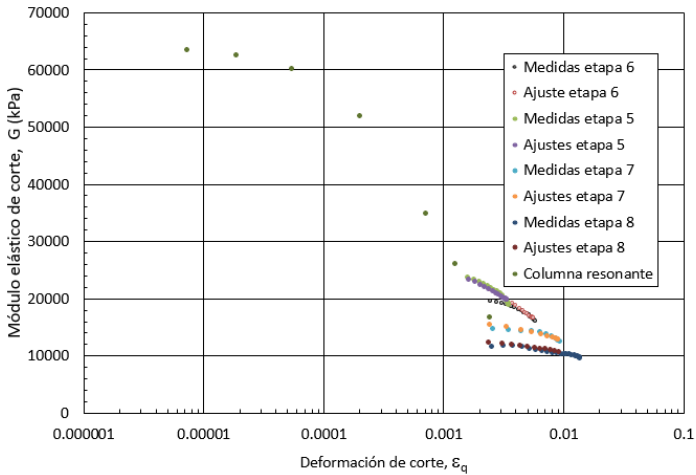
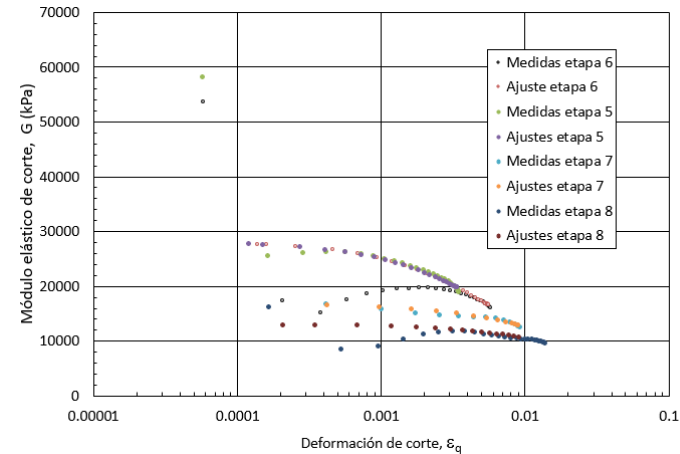
Etapa 8

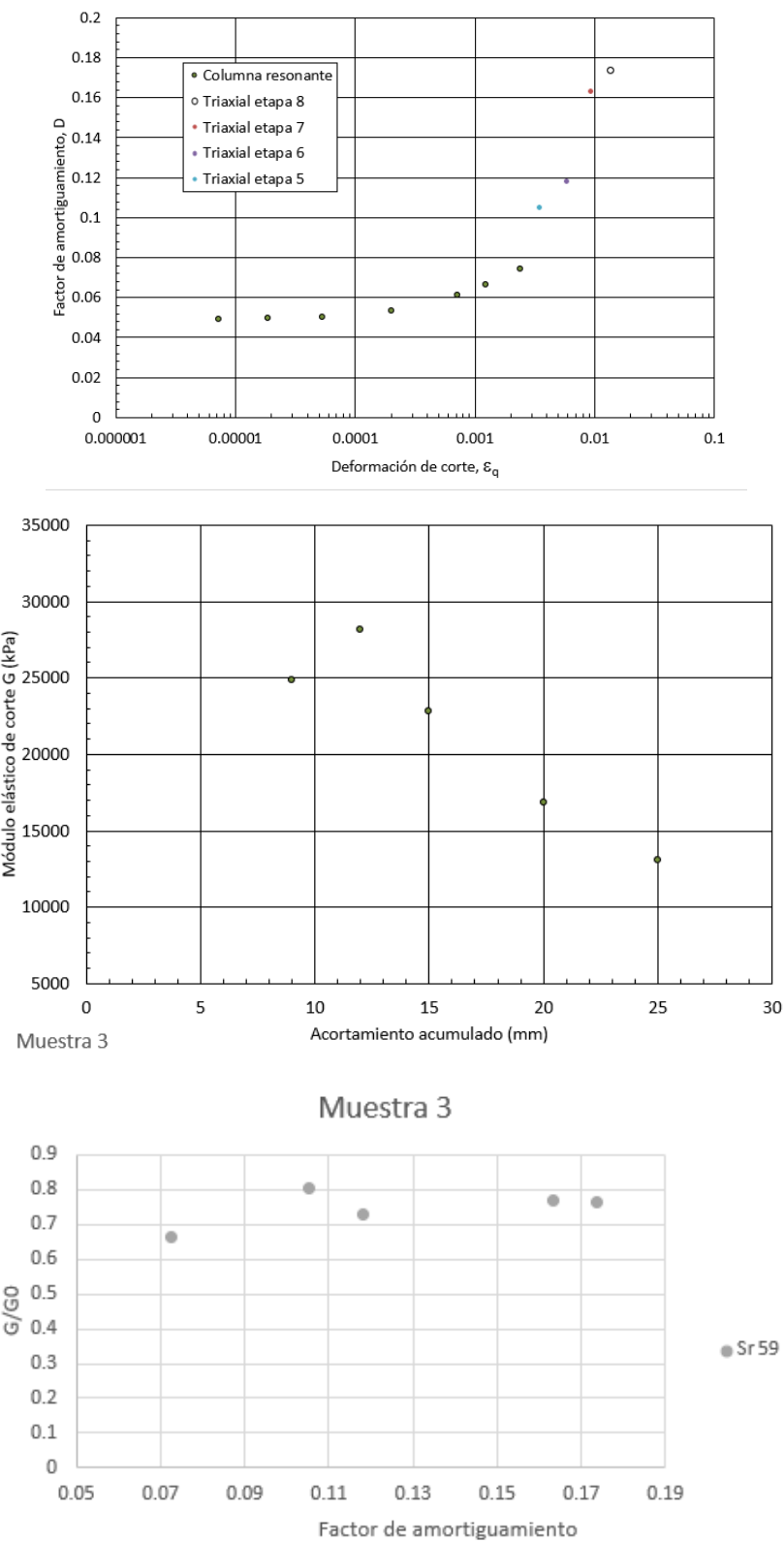




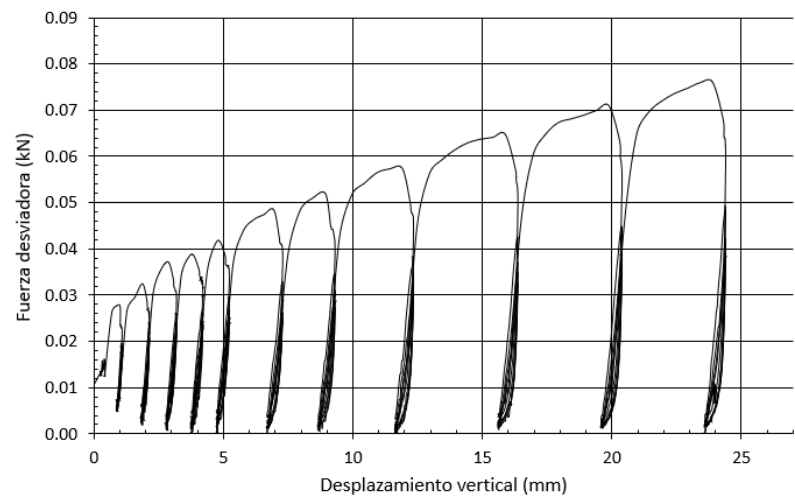


Todas las etapas

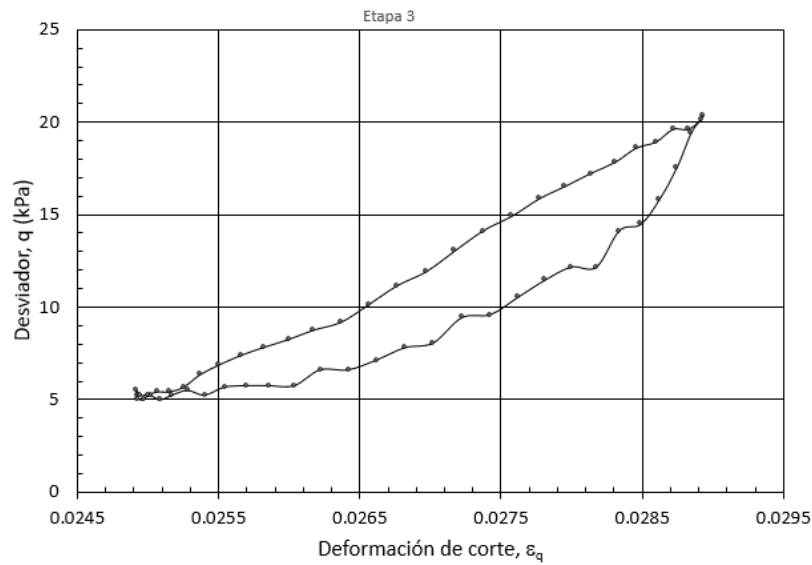
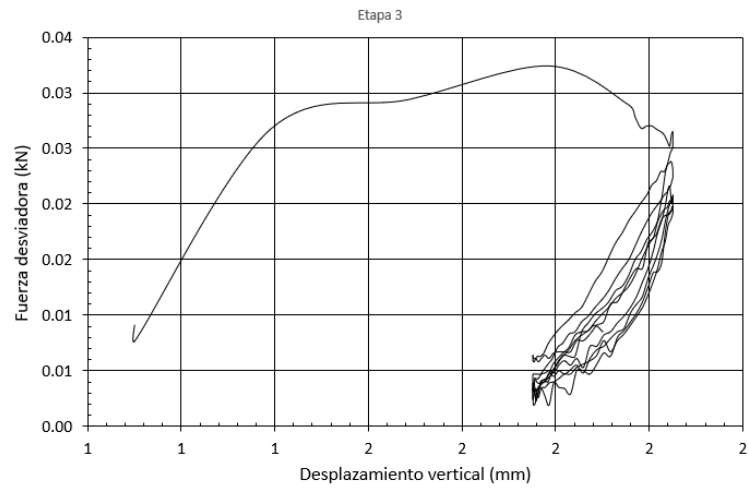


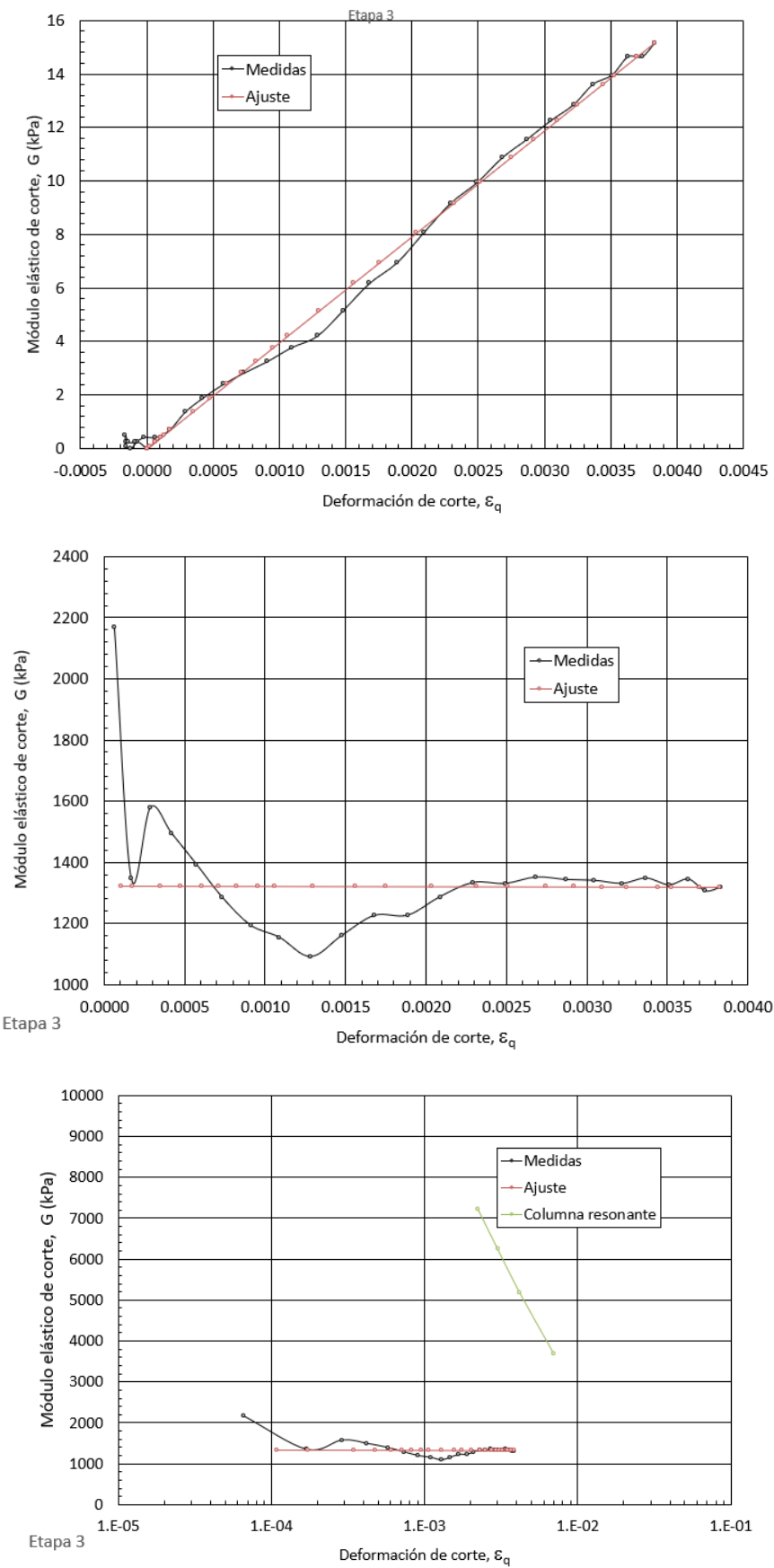


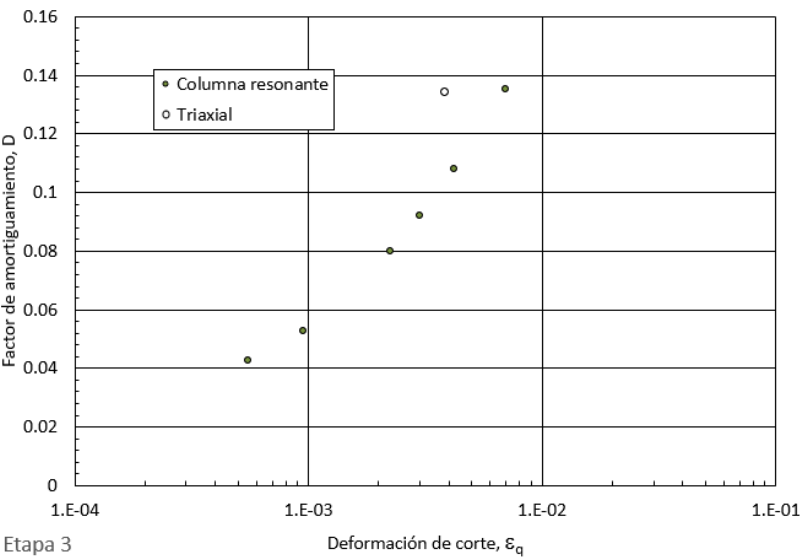
12.4. Anexo muestra 4



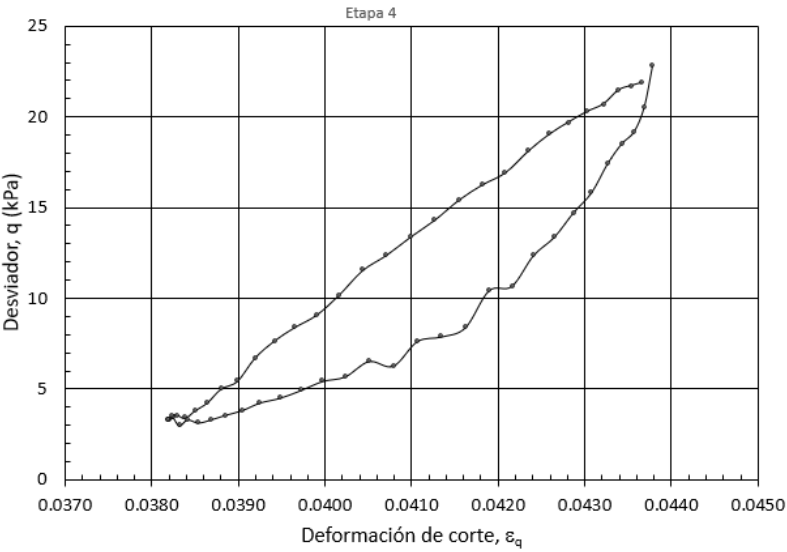
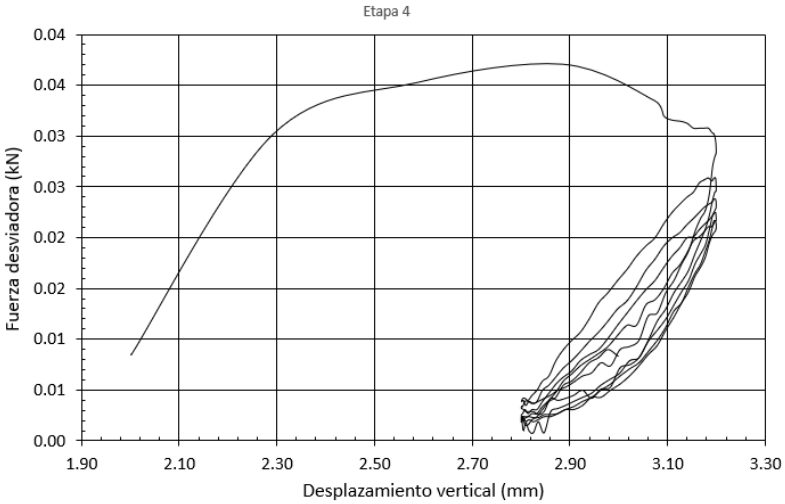
Etapa 3

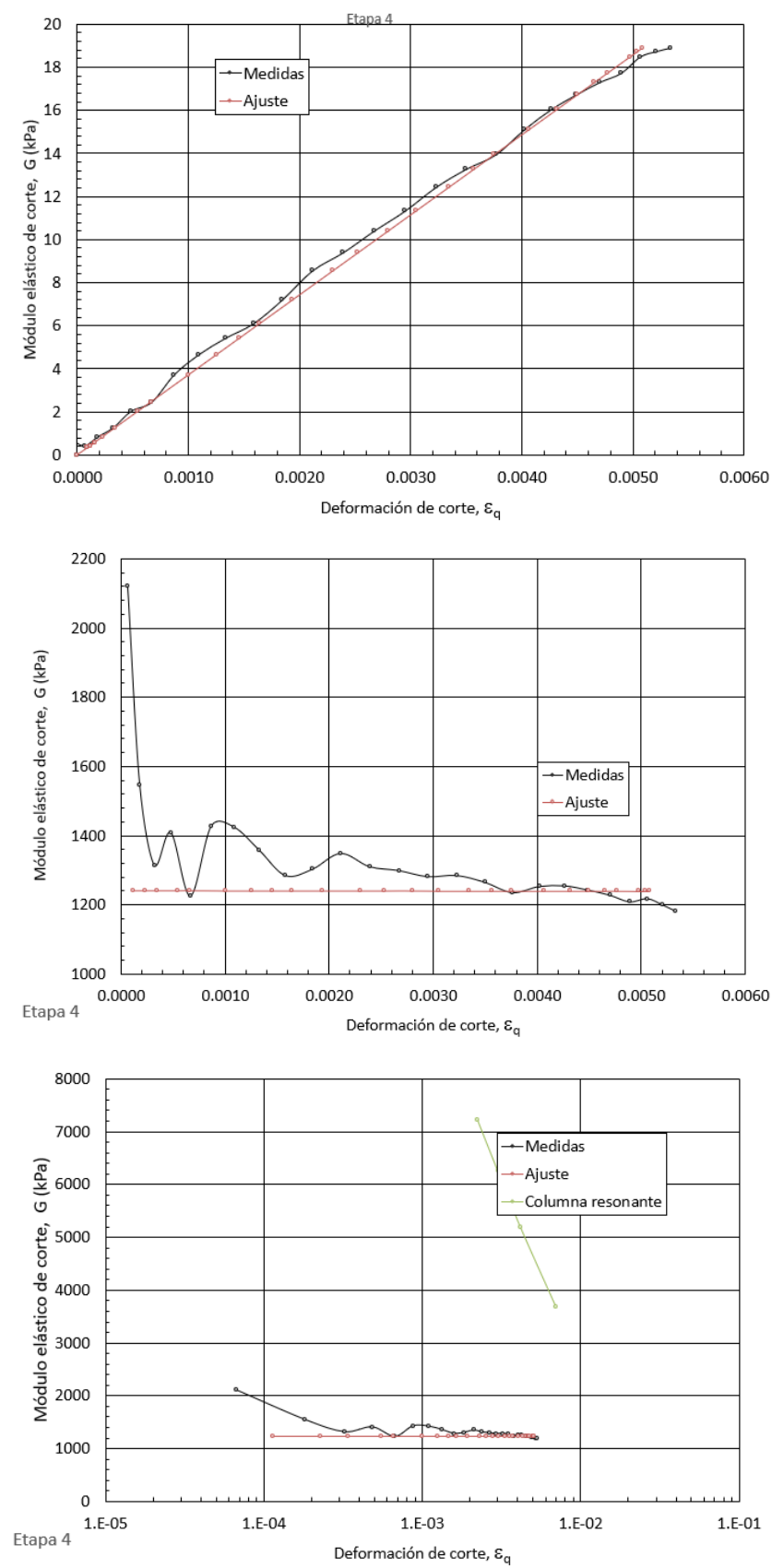


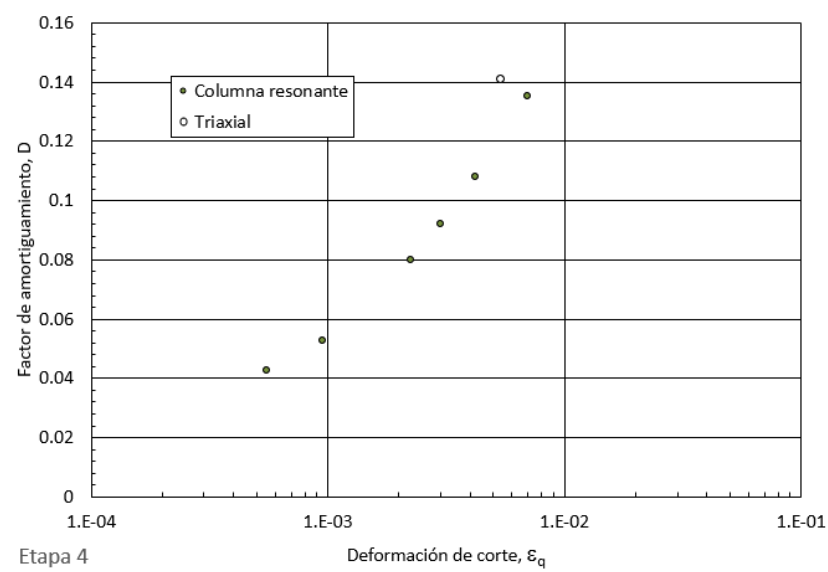




Etapa 4



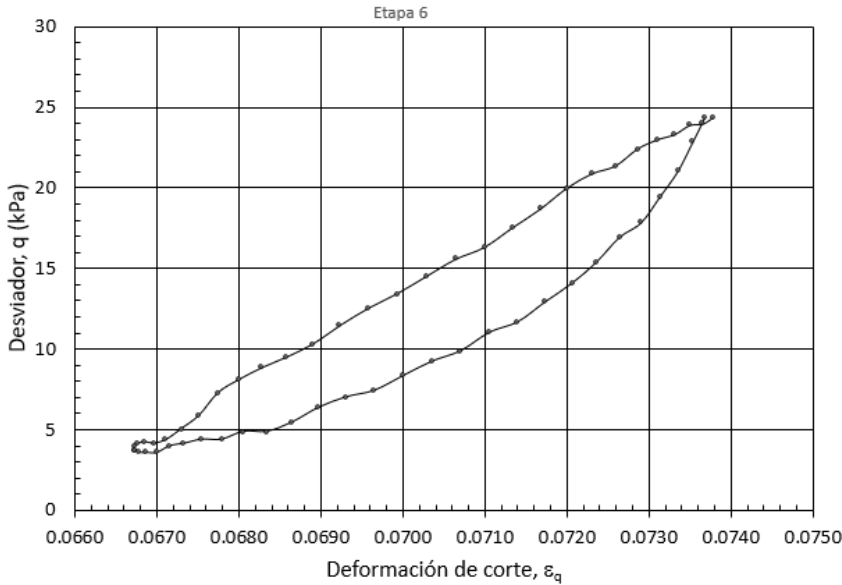
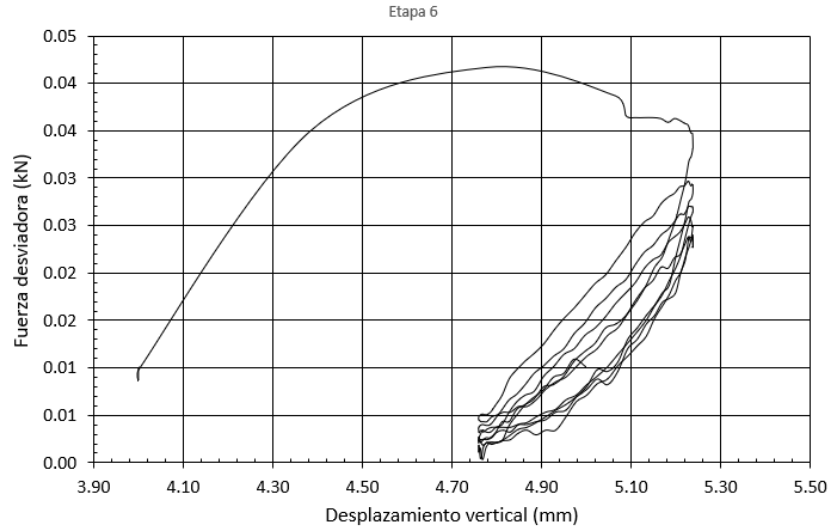


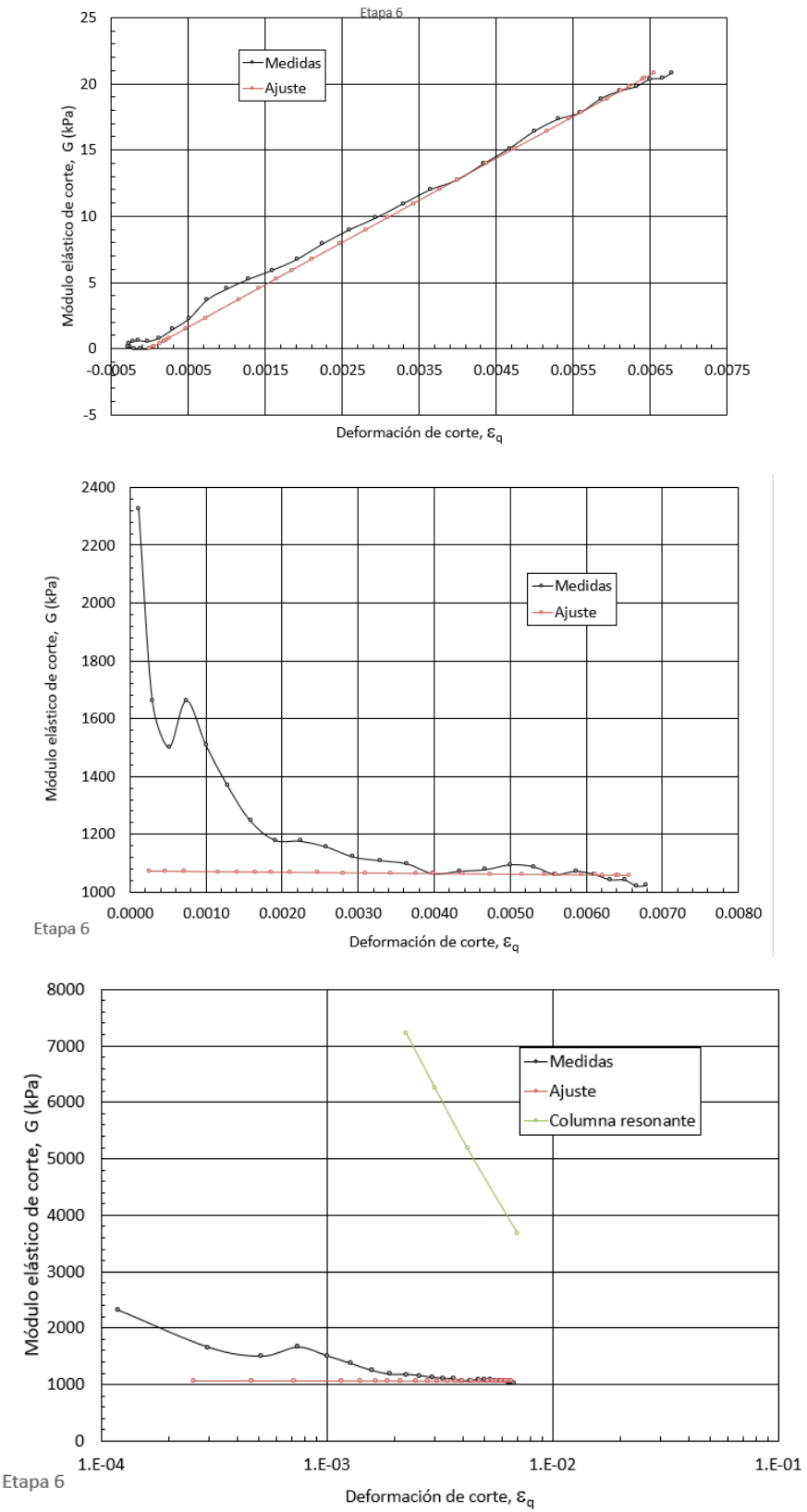


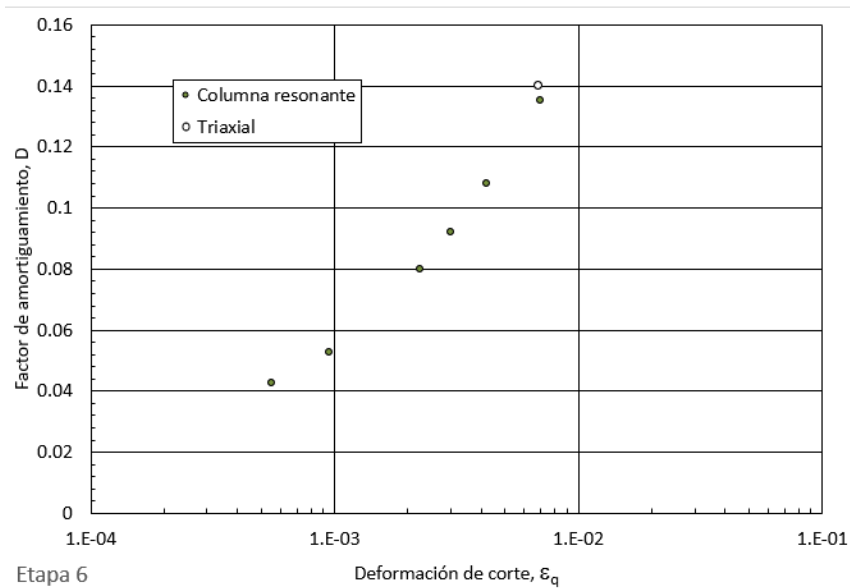
Etapa 4

Deformación de corte, ϵ_q

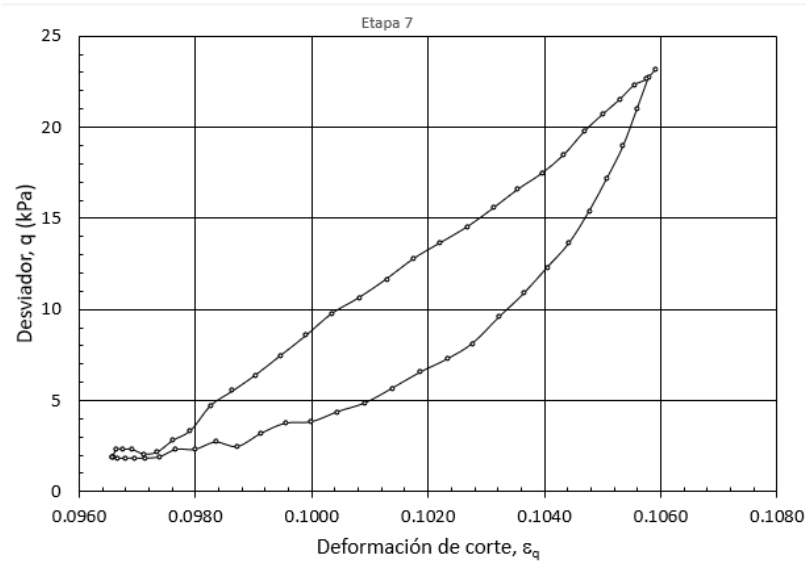
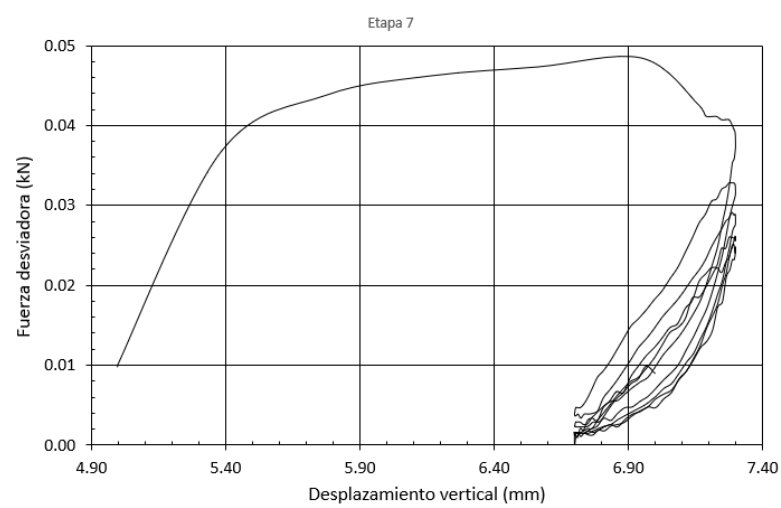
Etapa 6

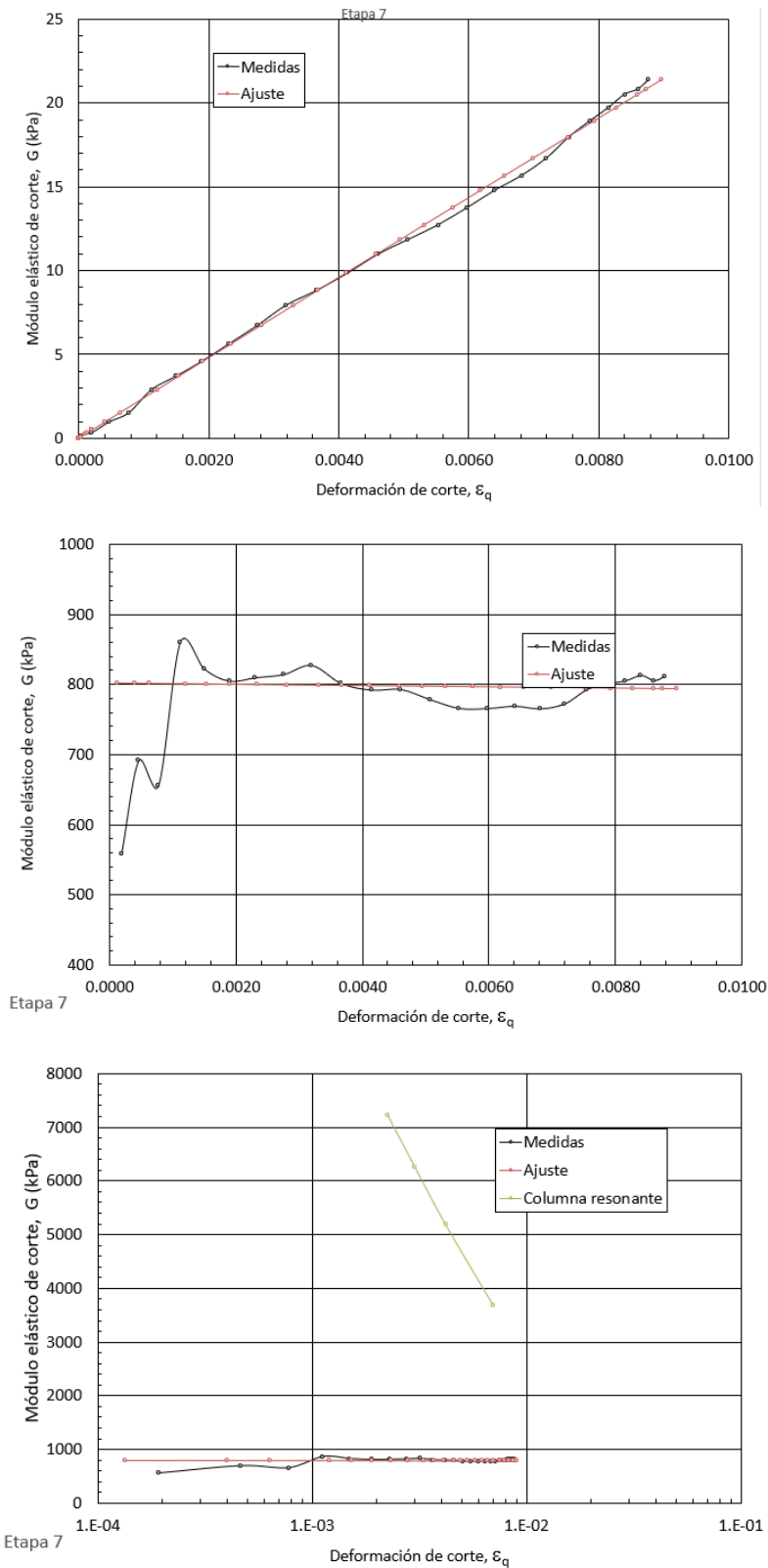


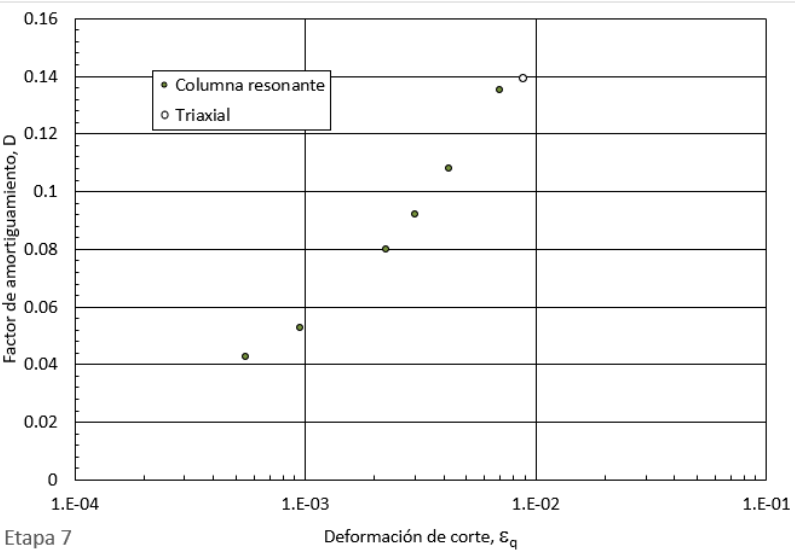




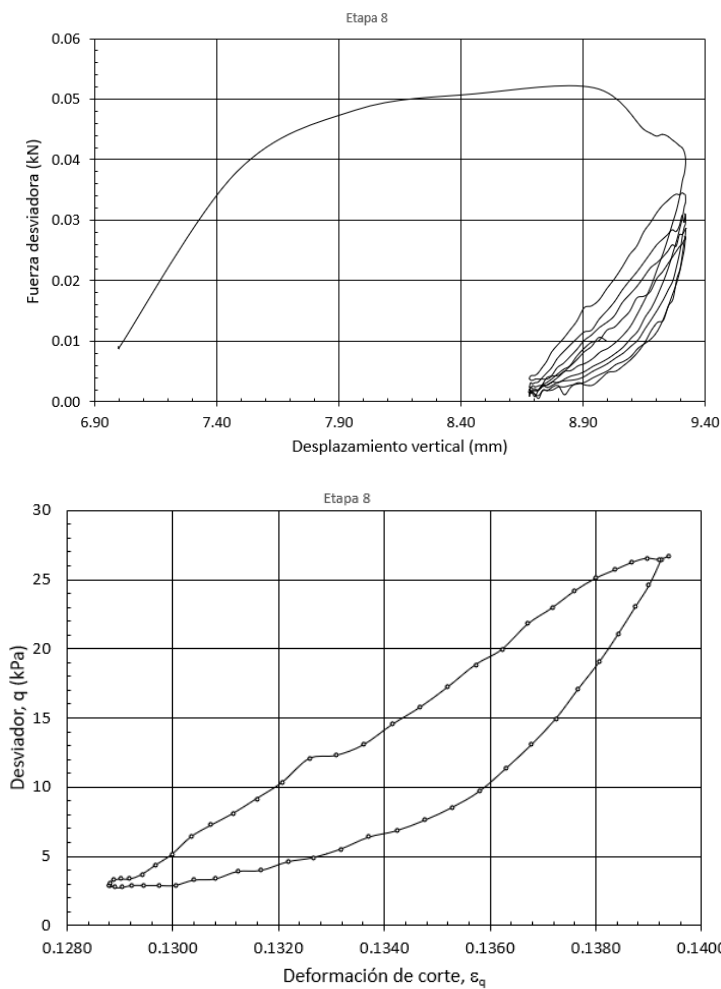
Etapa 7

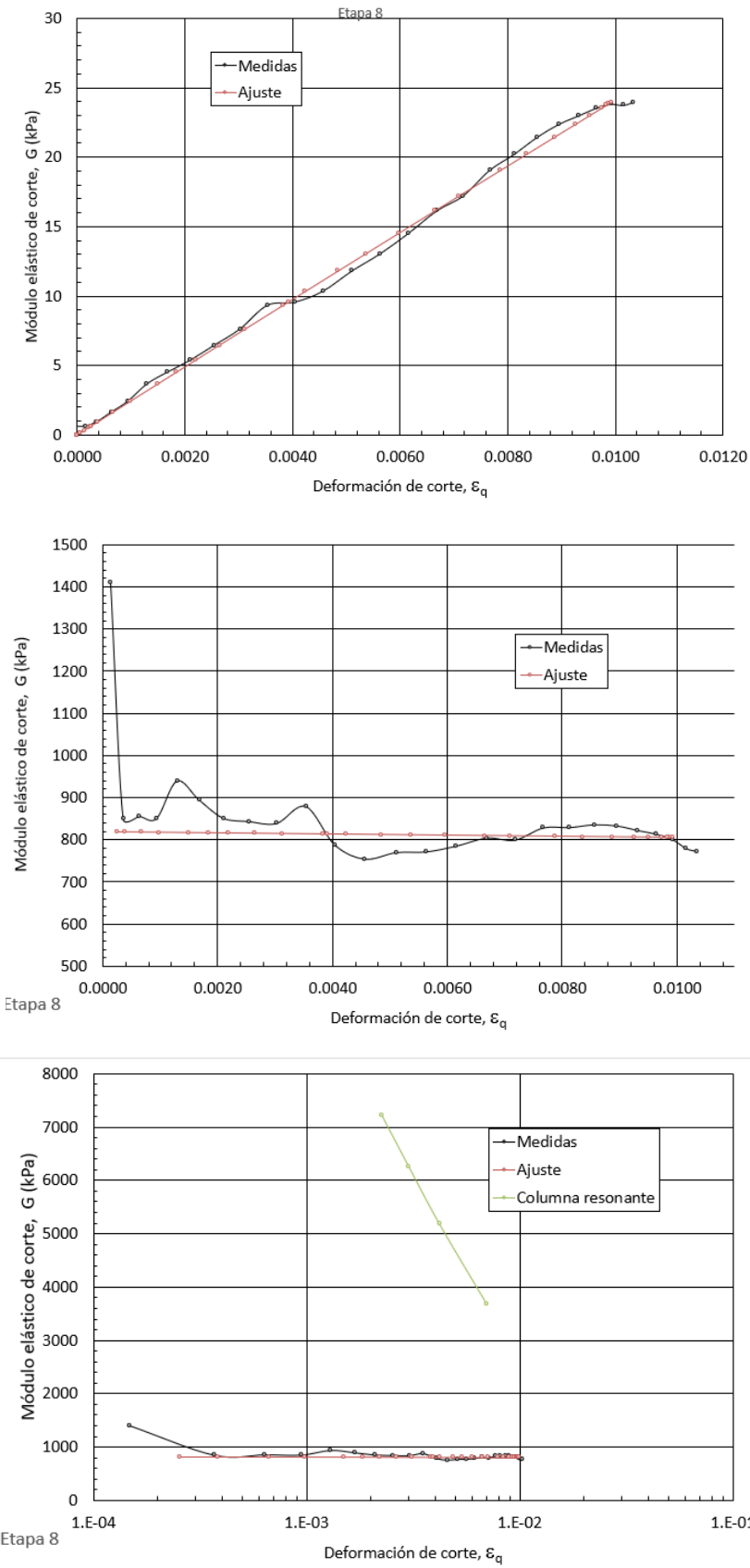


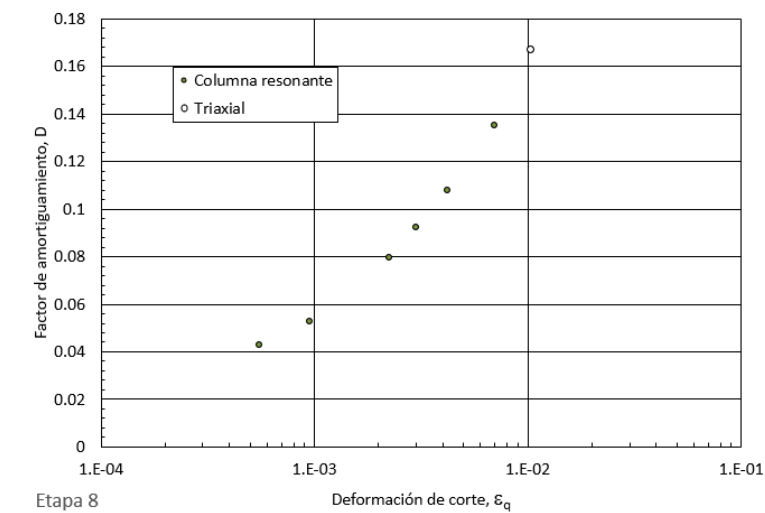




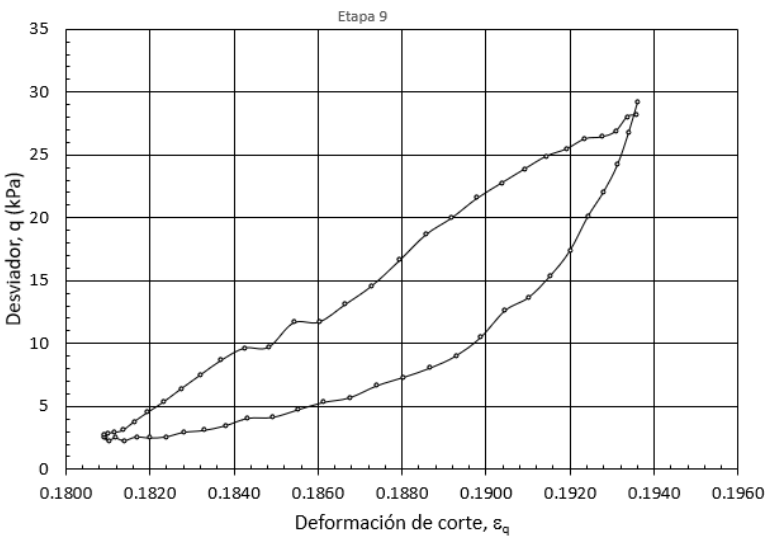
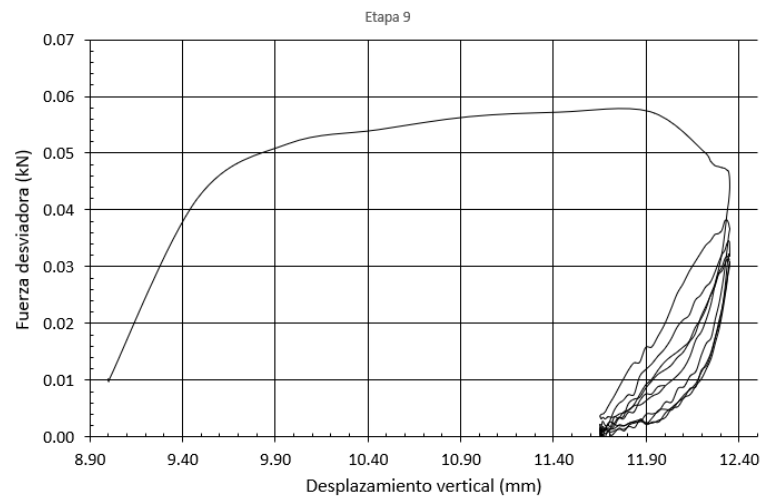
Etapa 8

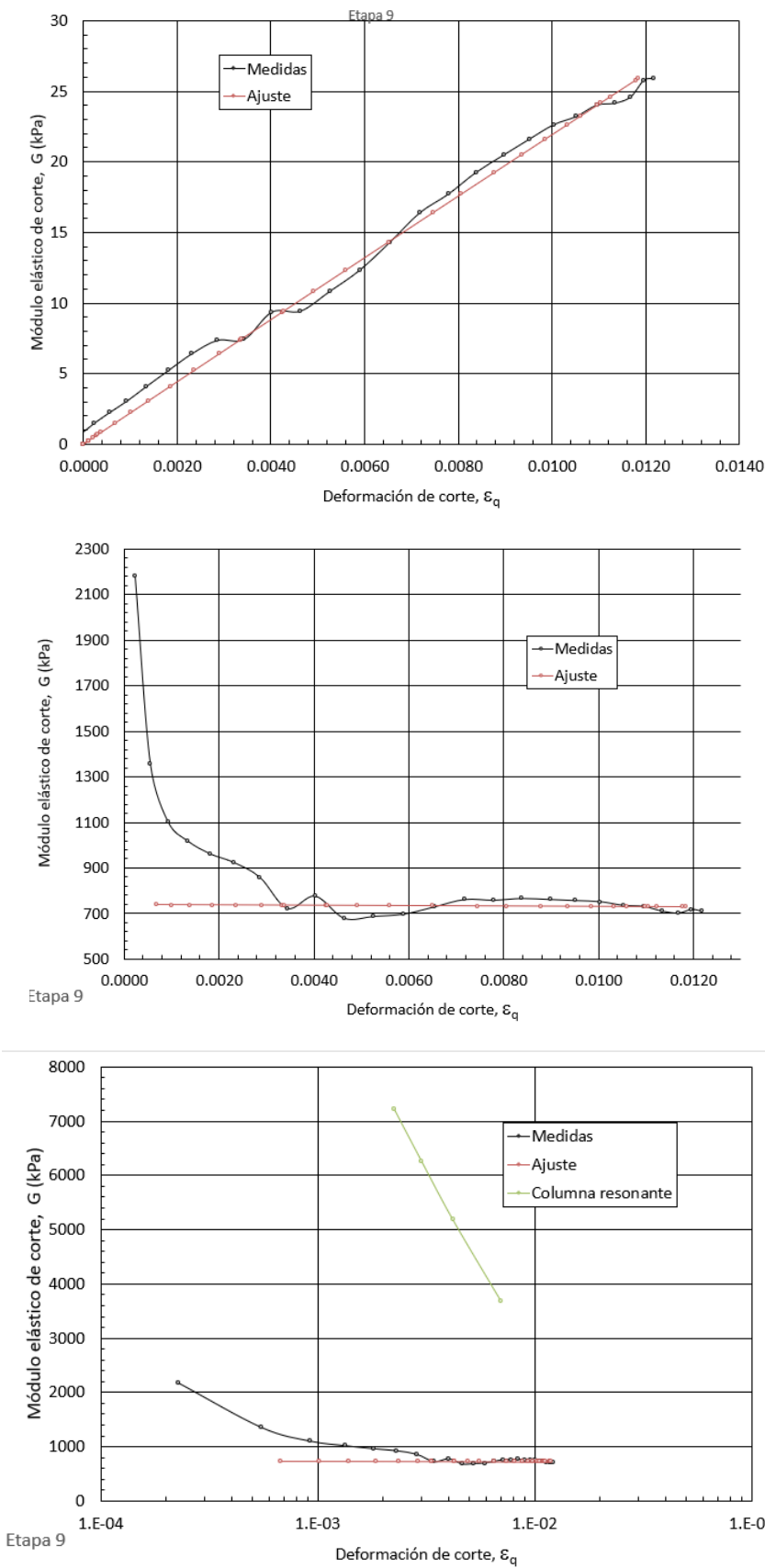


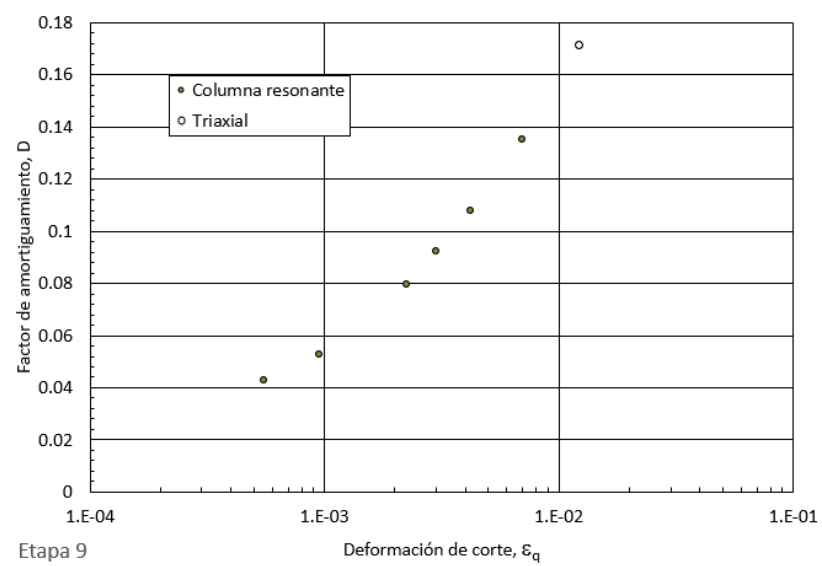




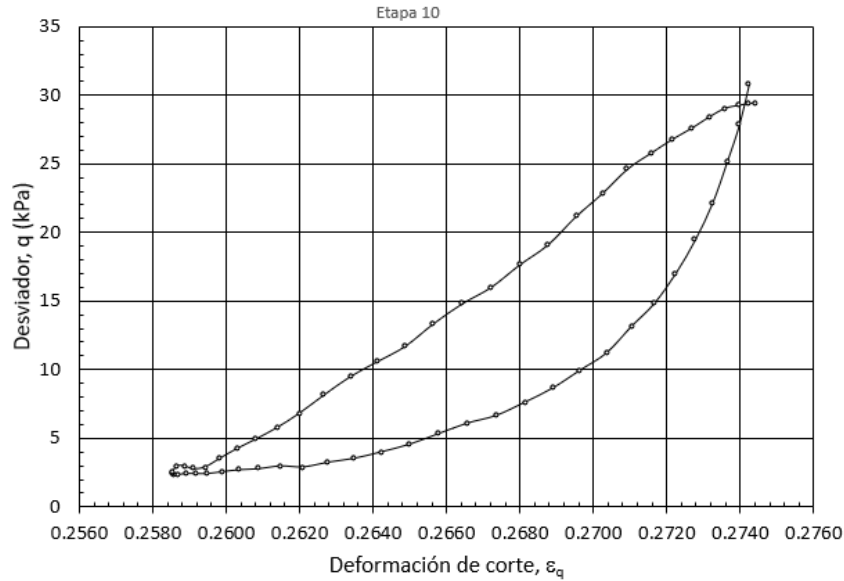
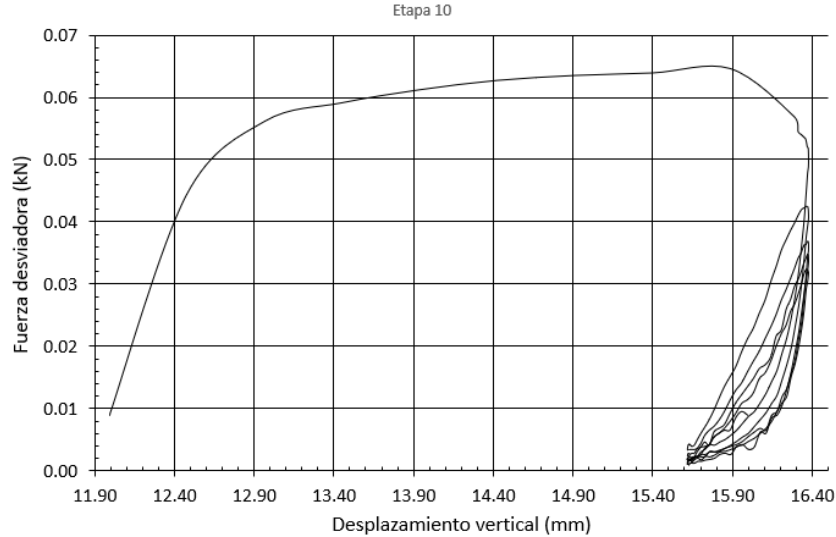
Etapa 9

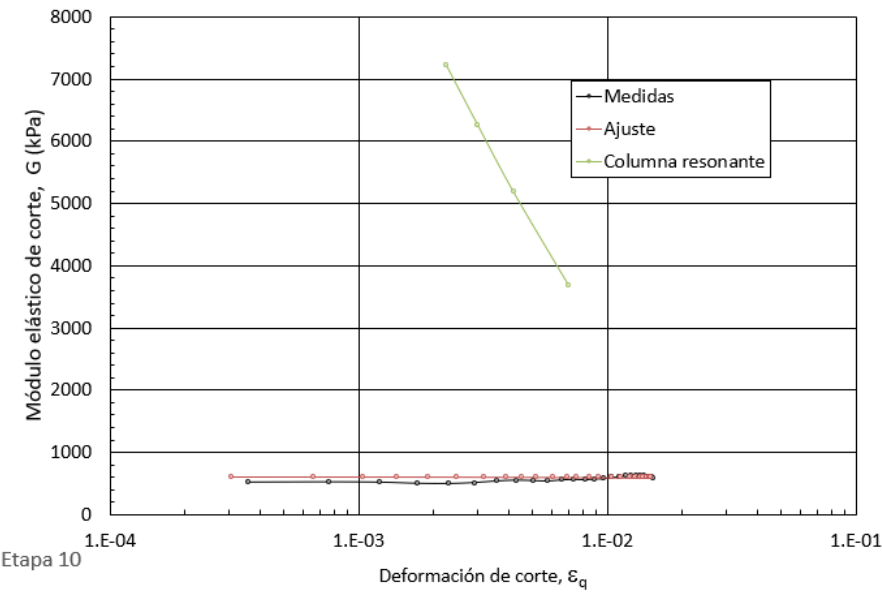
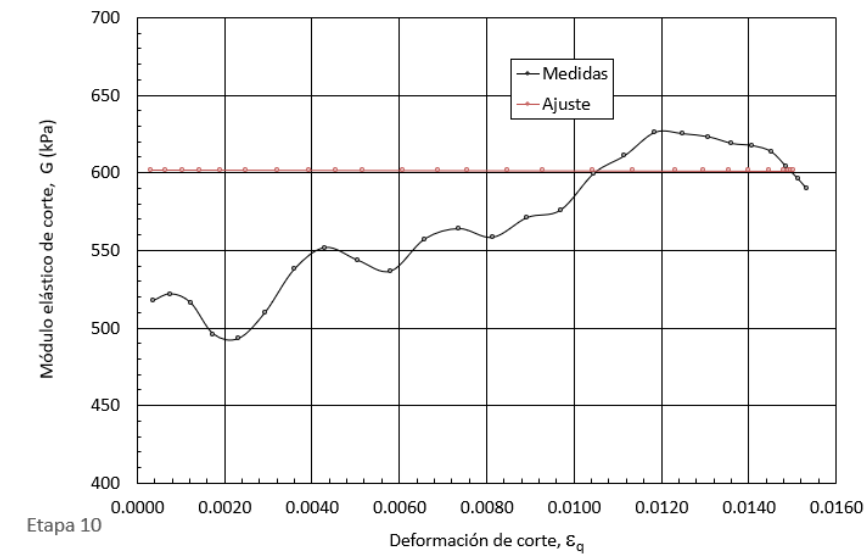
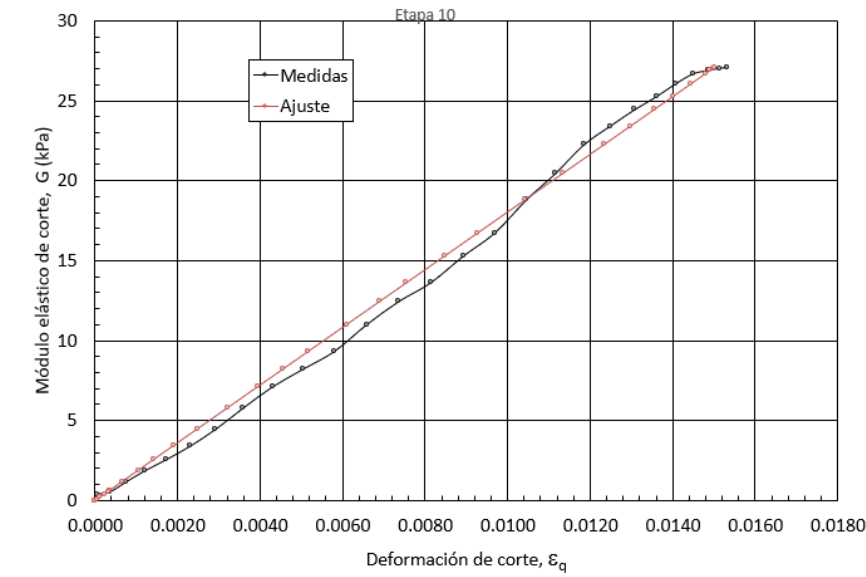


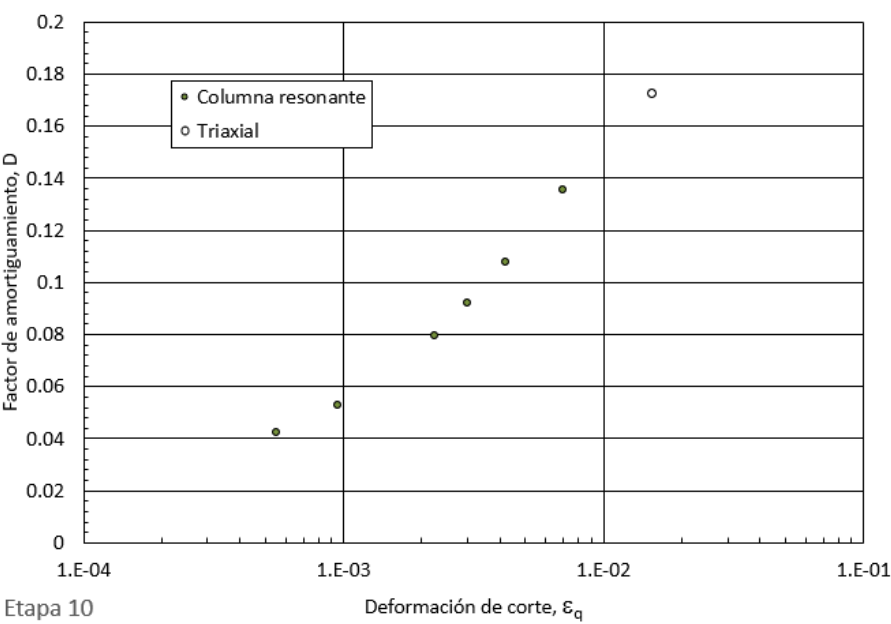




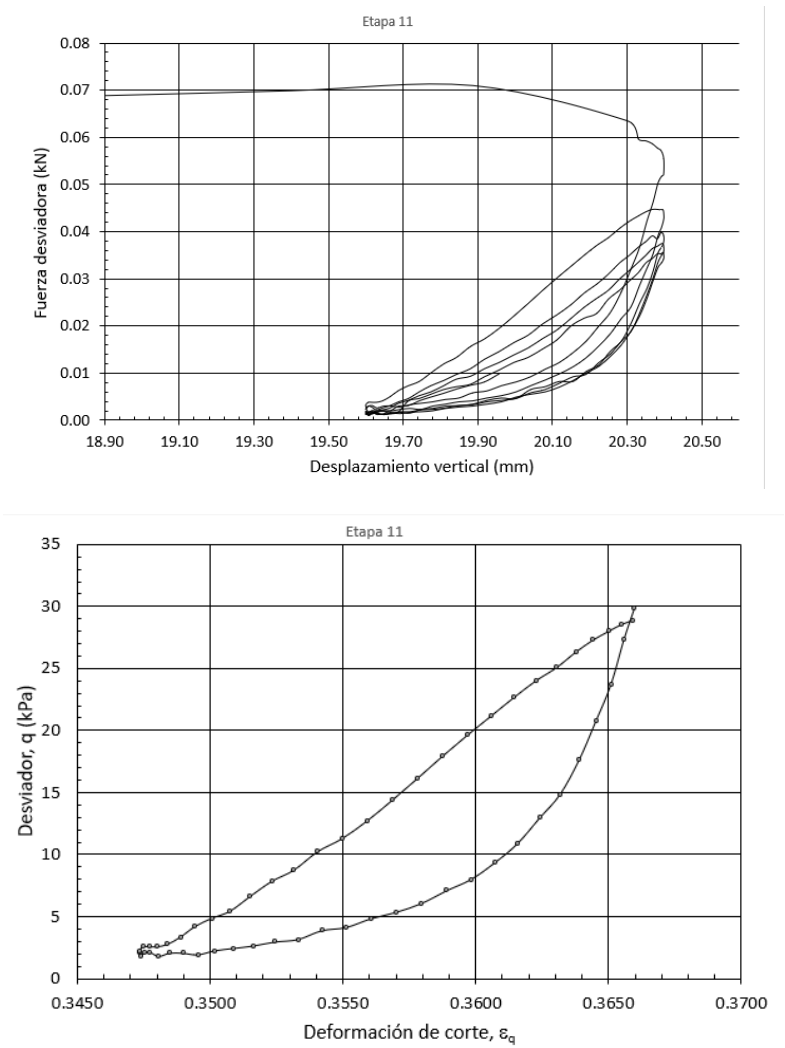
Etapa 10

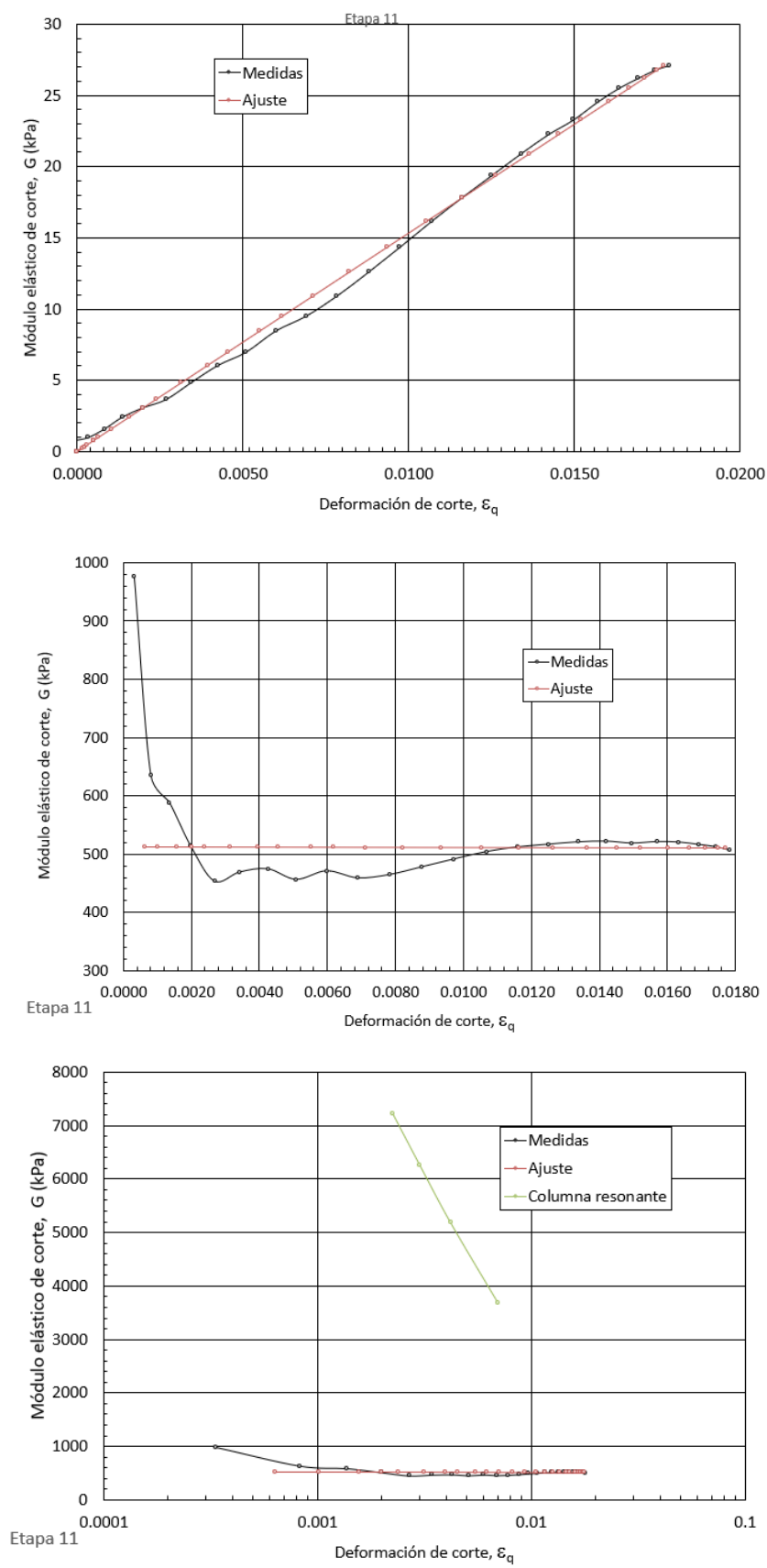


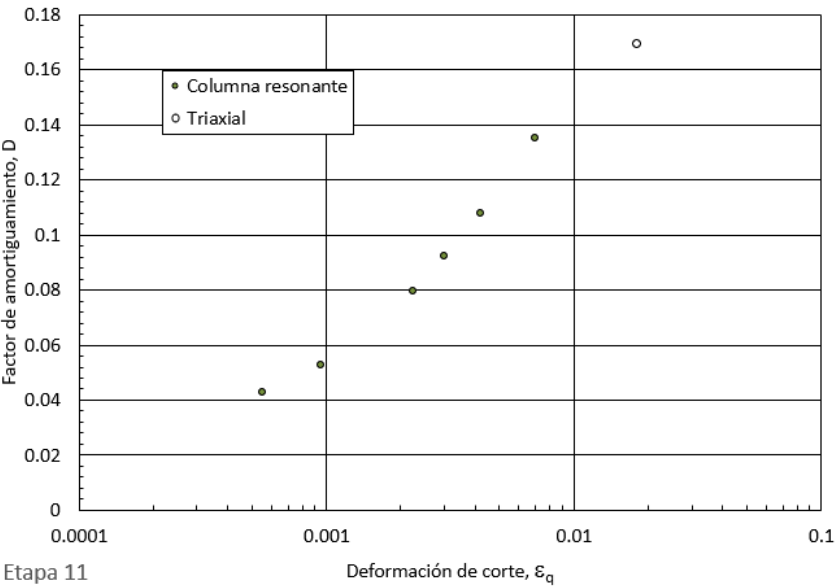




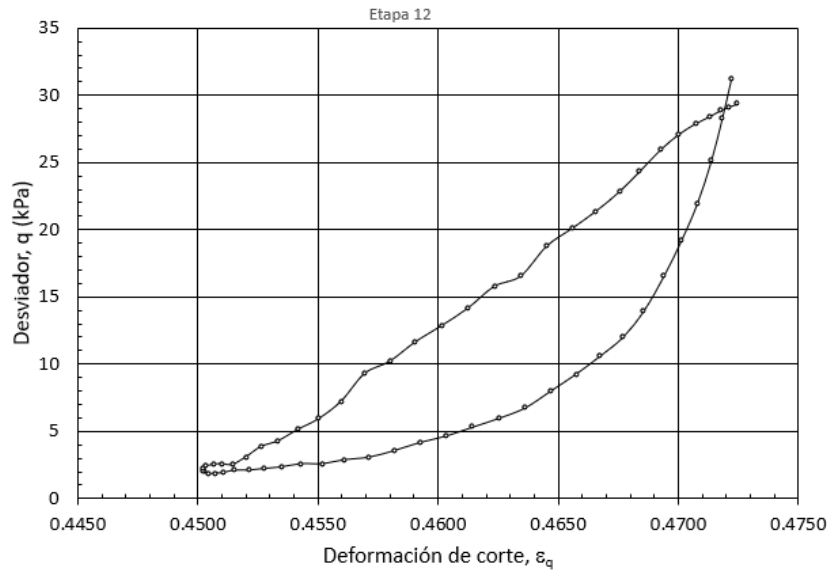
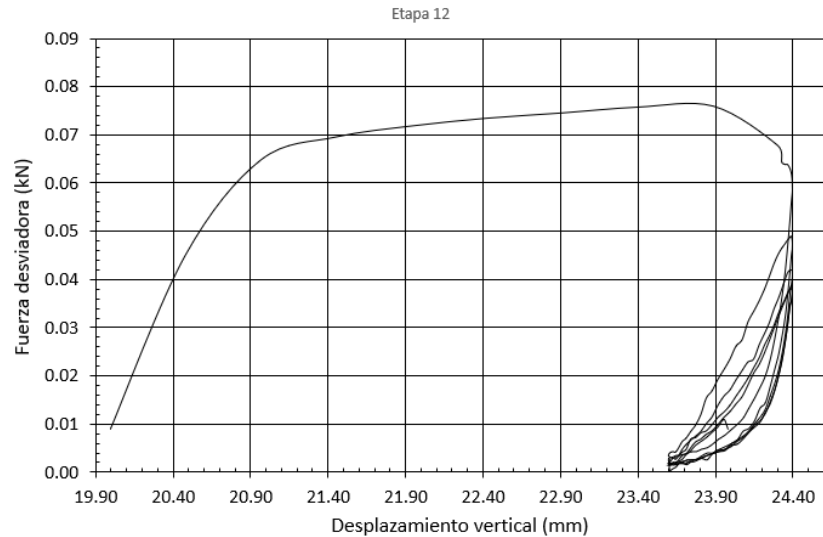
Etapa 11

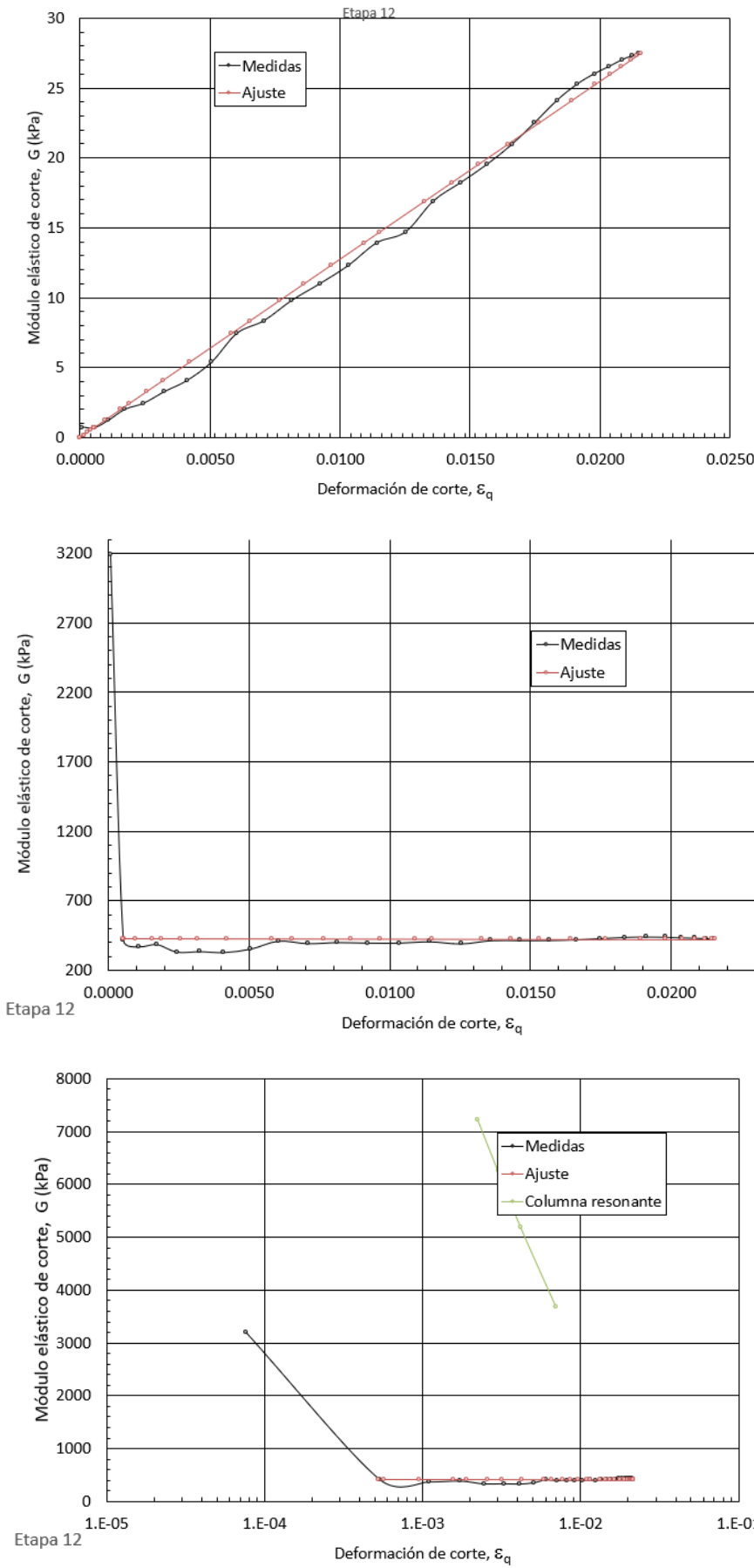


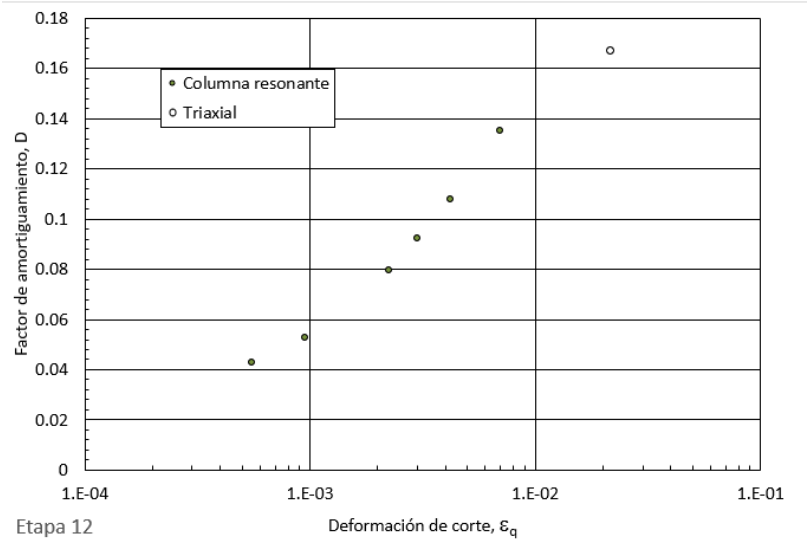




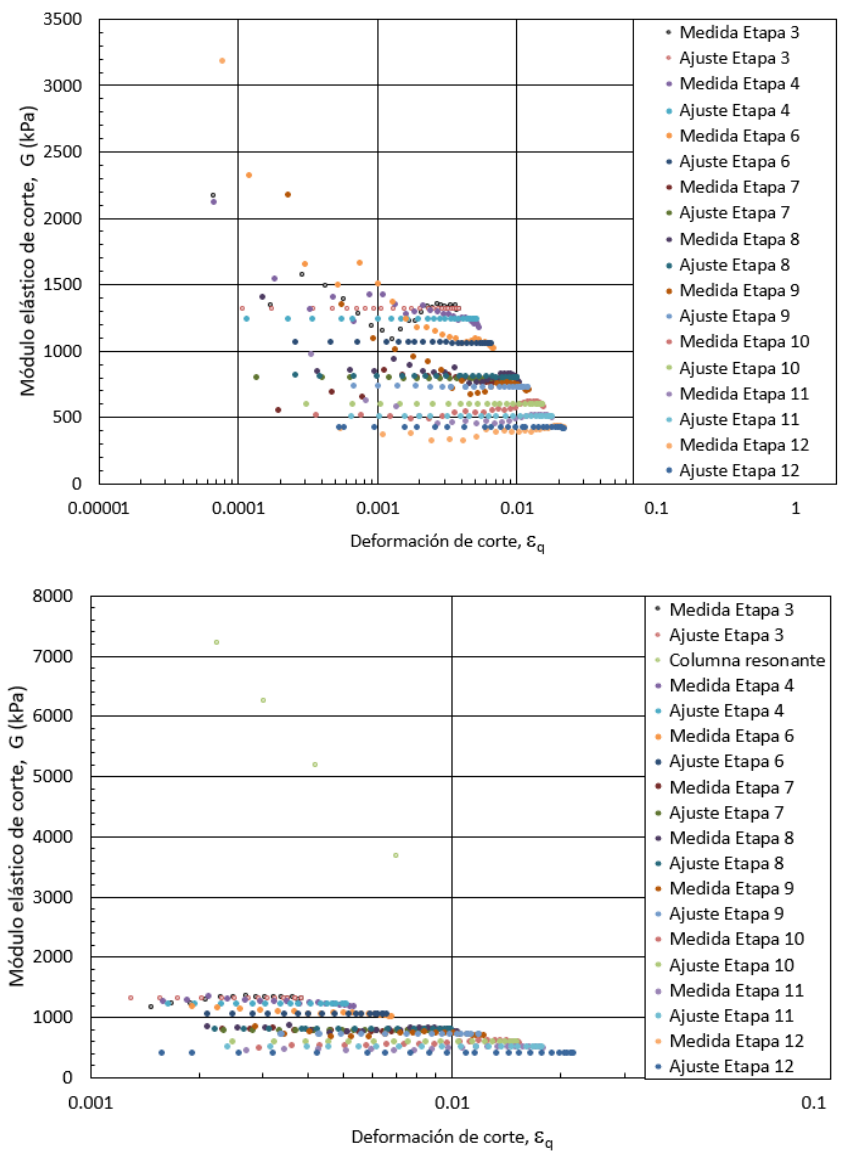
Etapa 12

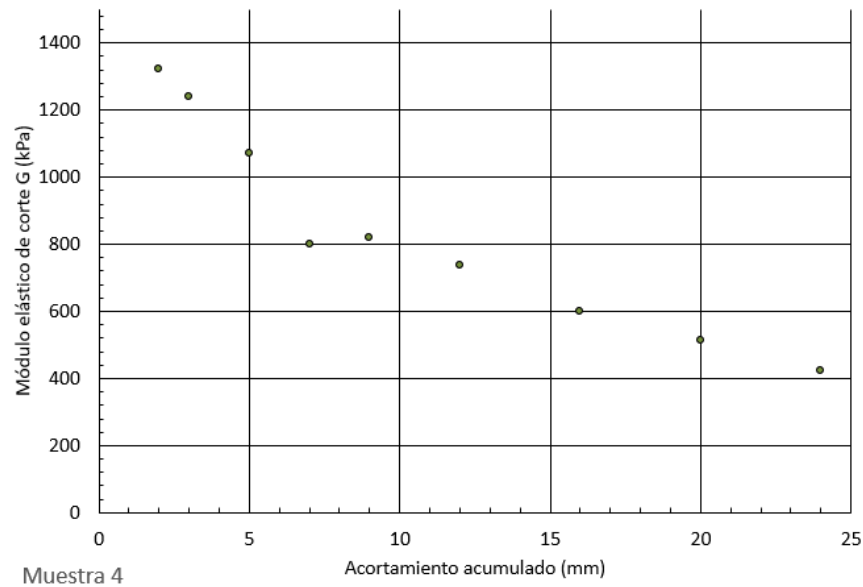
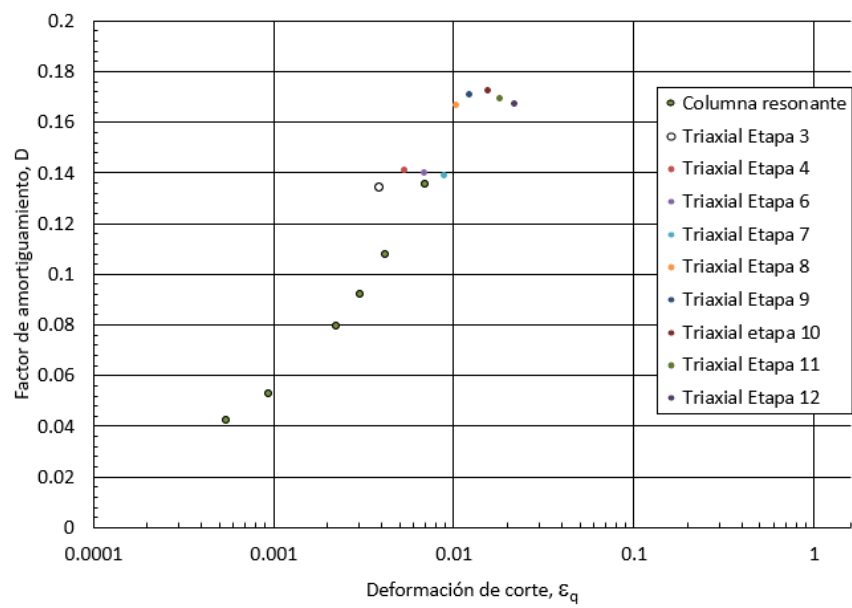




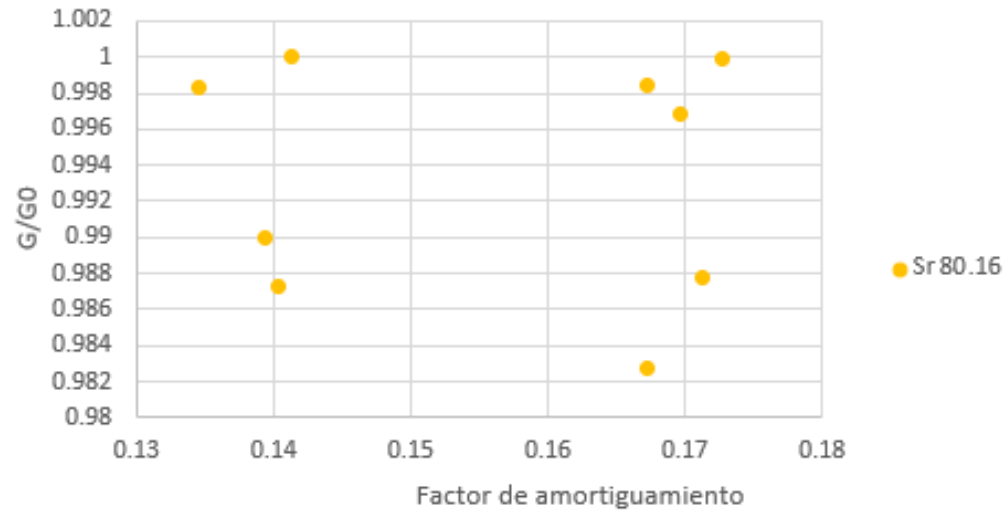


Todas las etapas

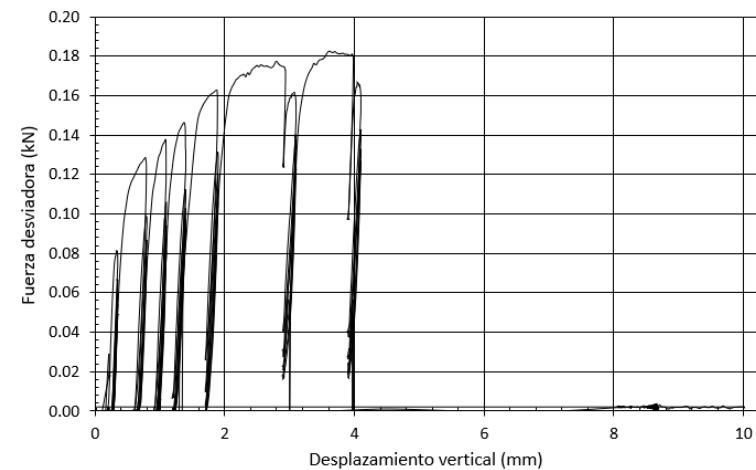




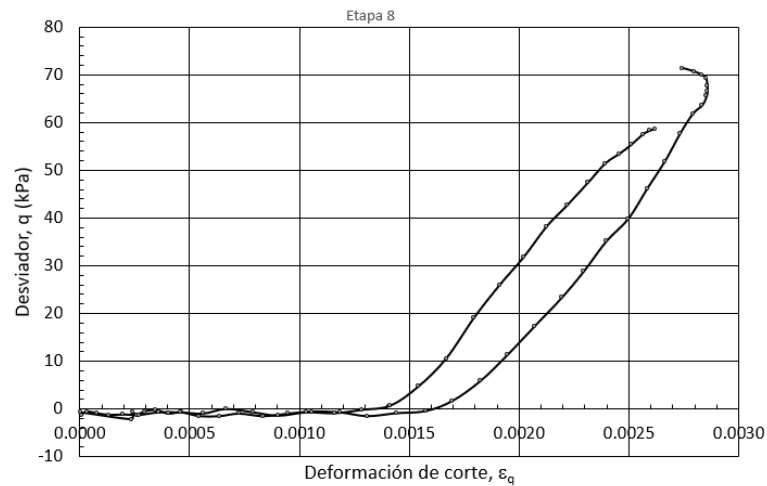
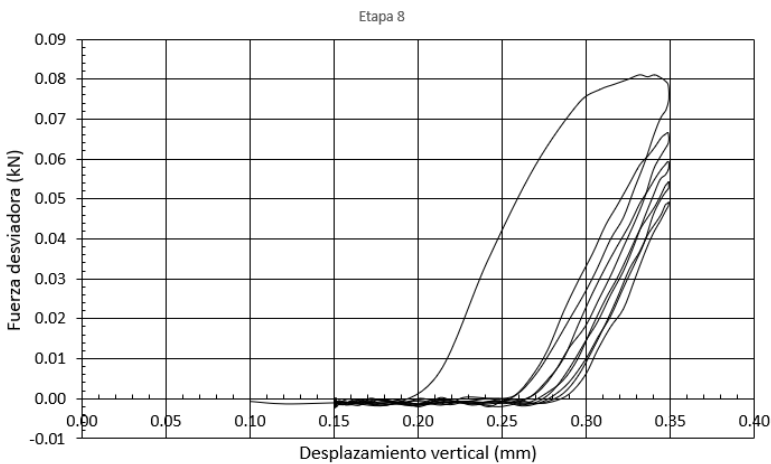
Muestra 4

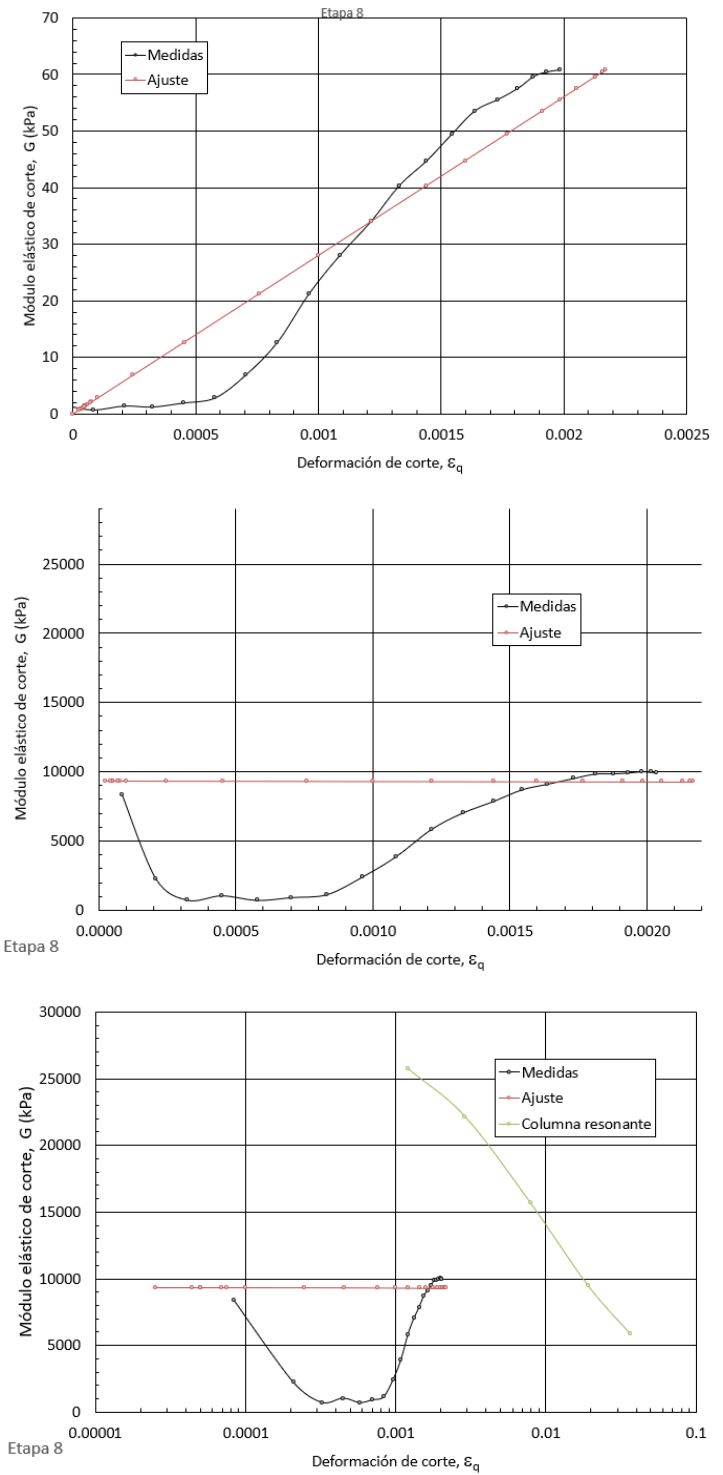


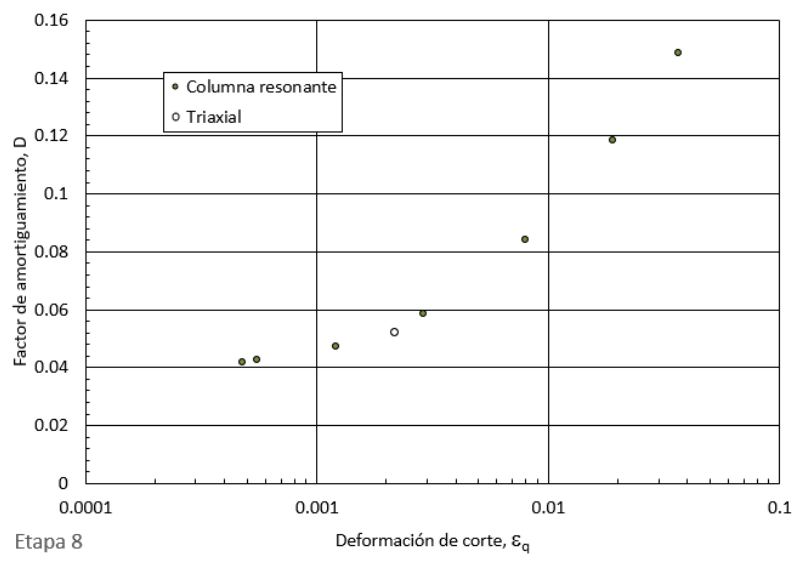
12.5. Anexo muestra 5



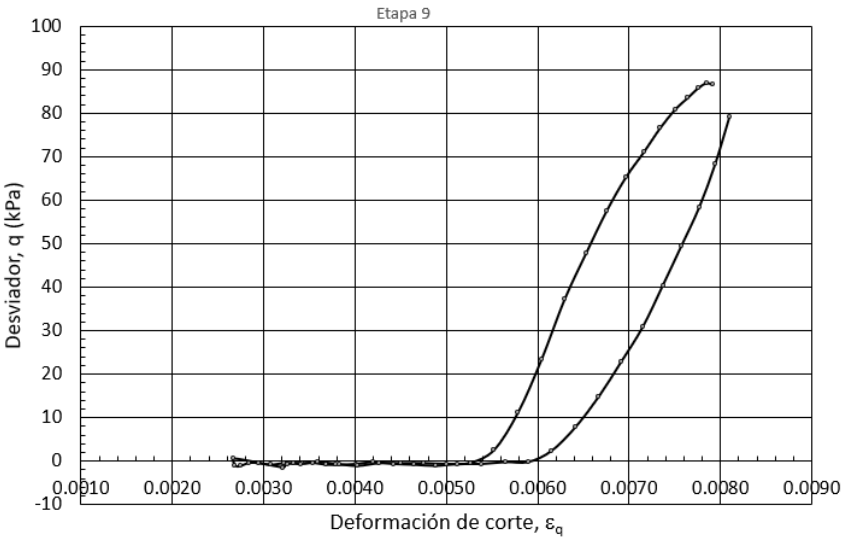
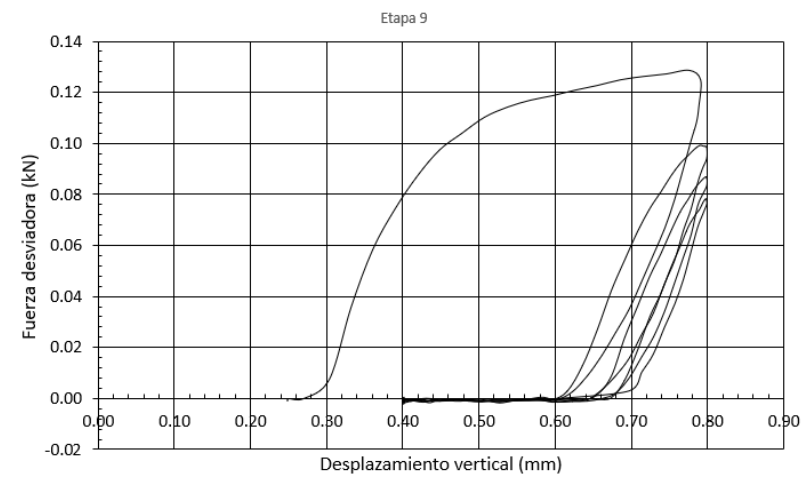
Etapas 8

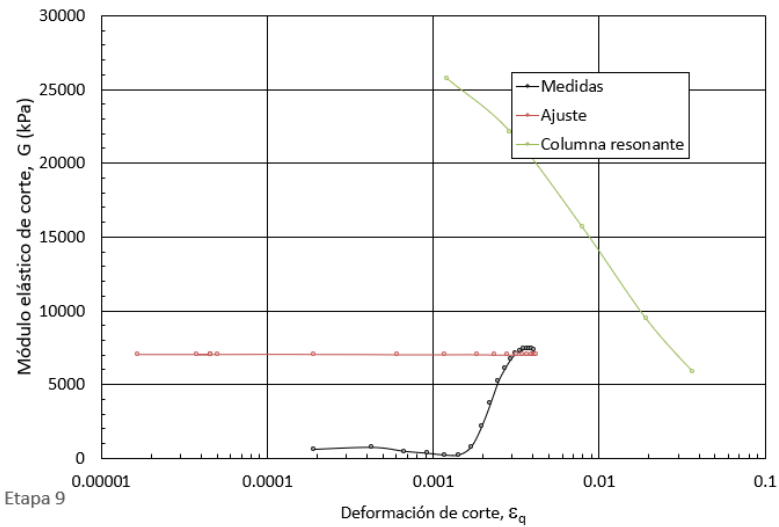
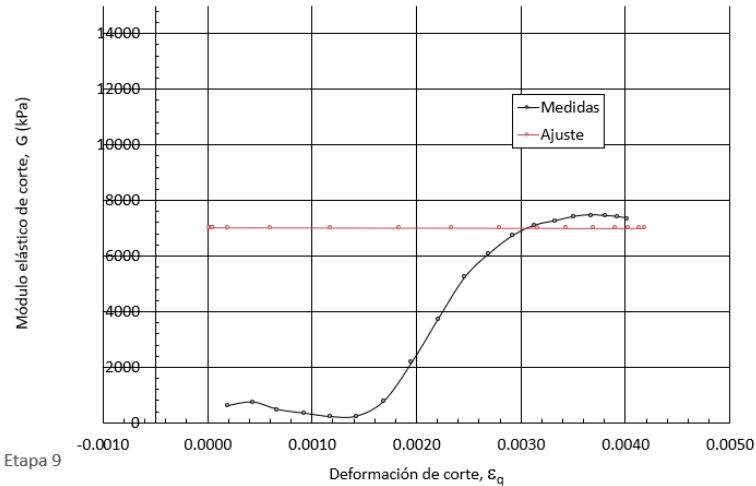
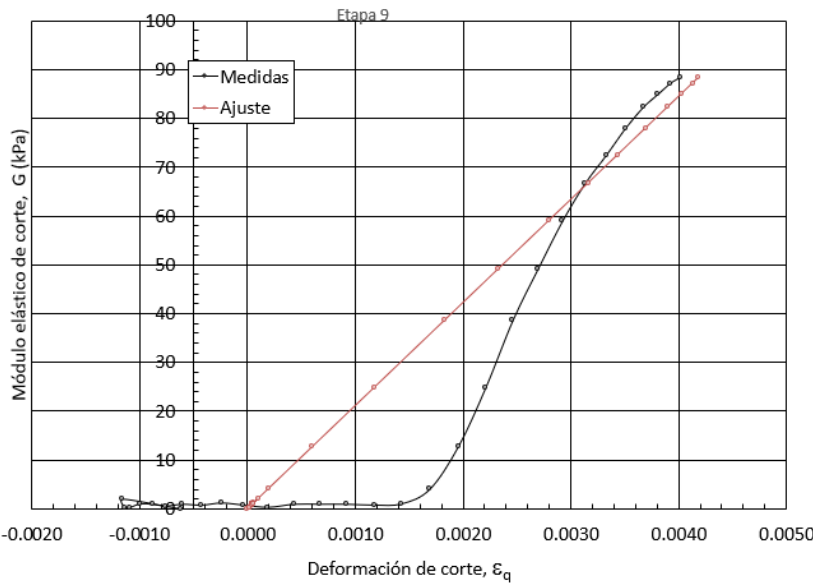


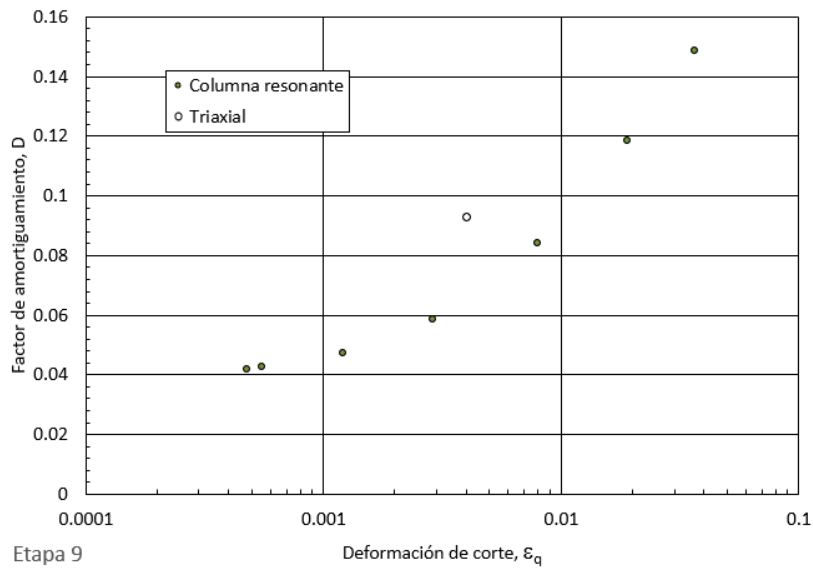




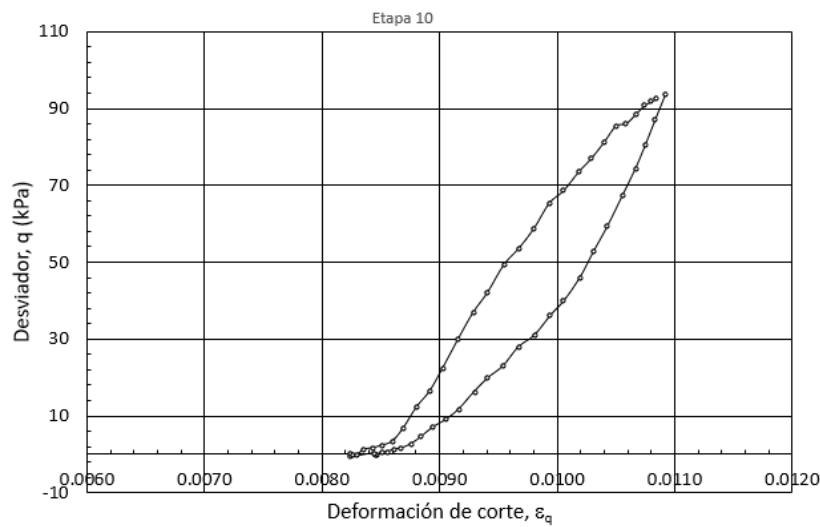
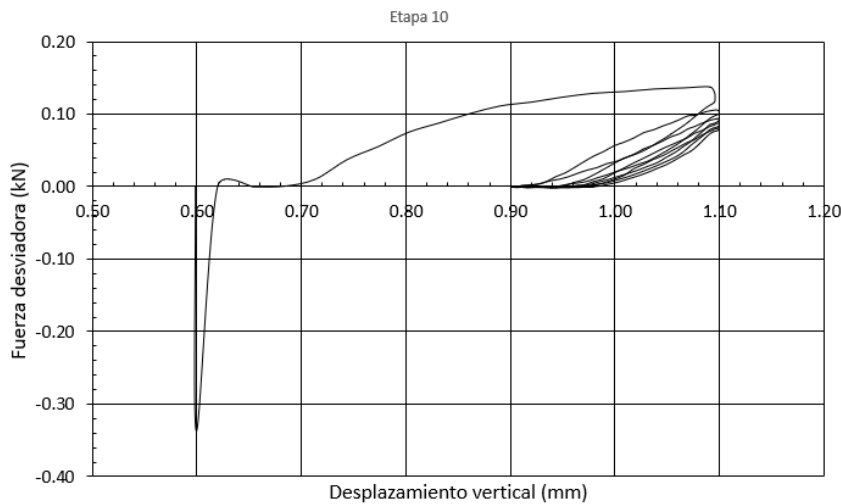
Etapa 9

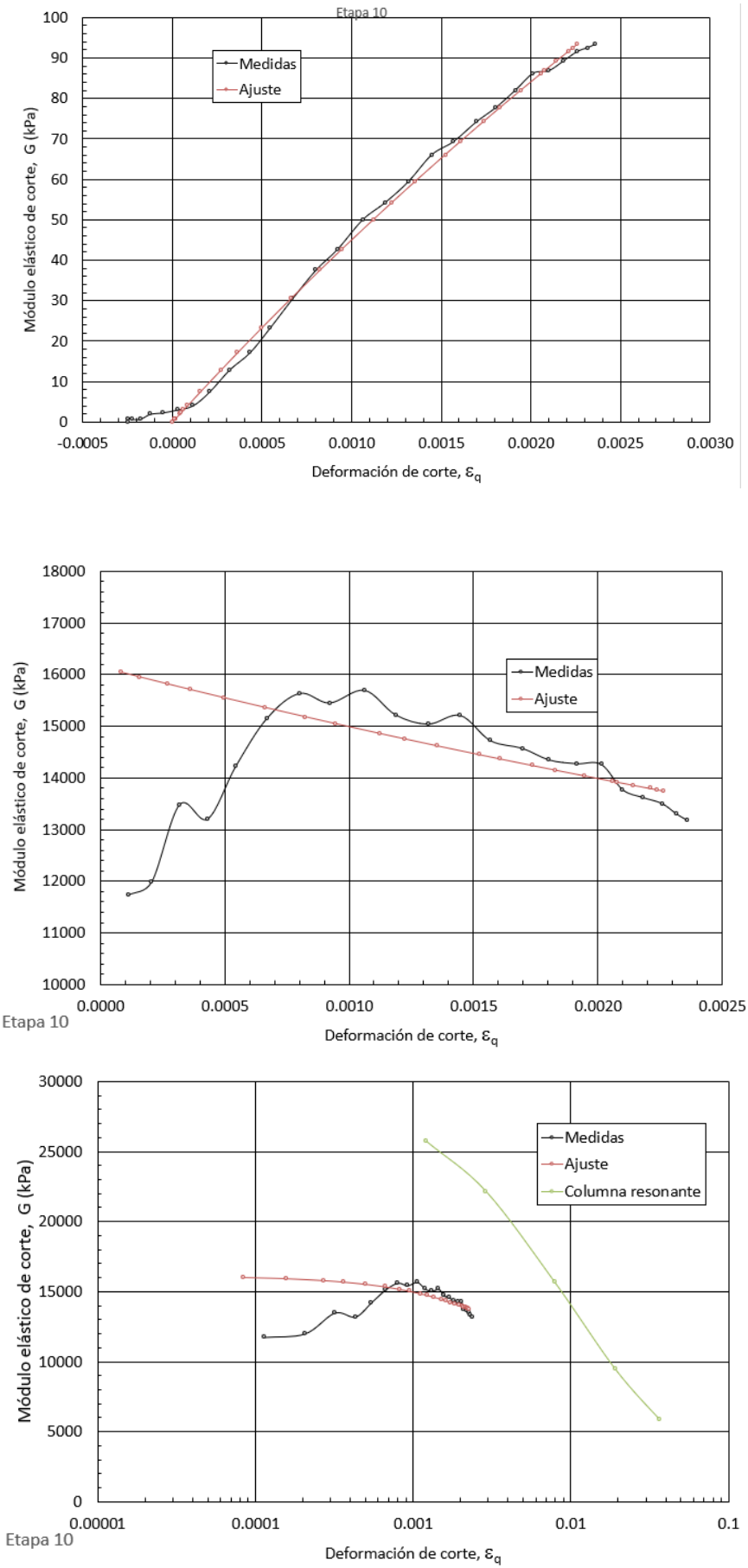


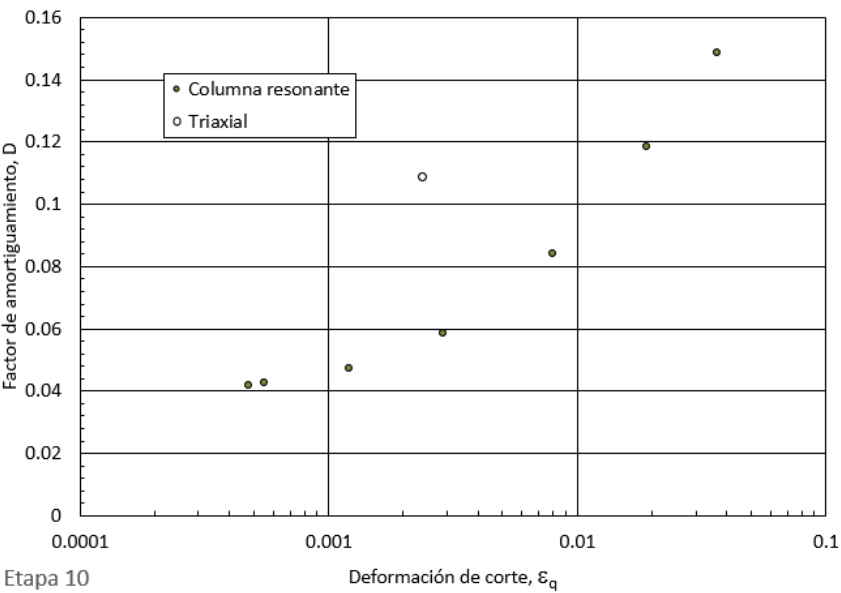




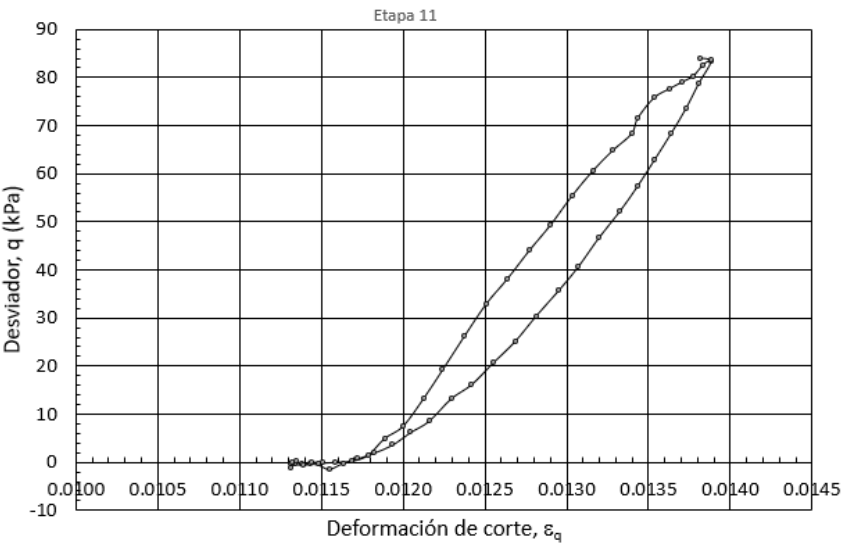
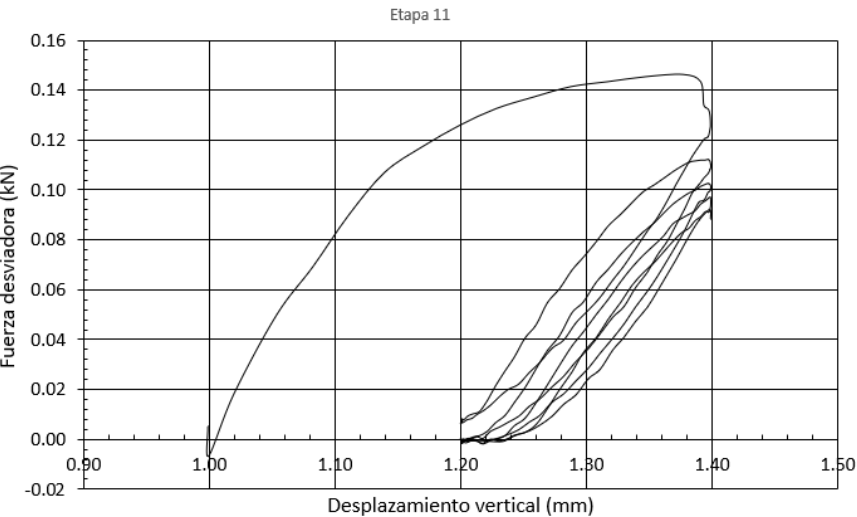
Etapa 10

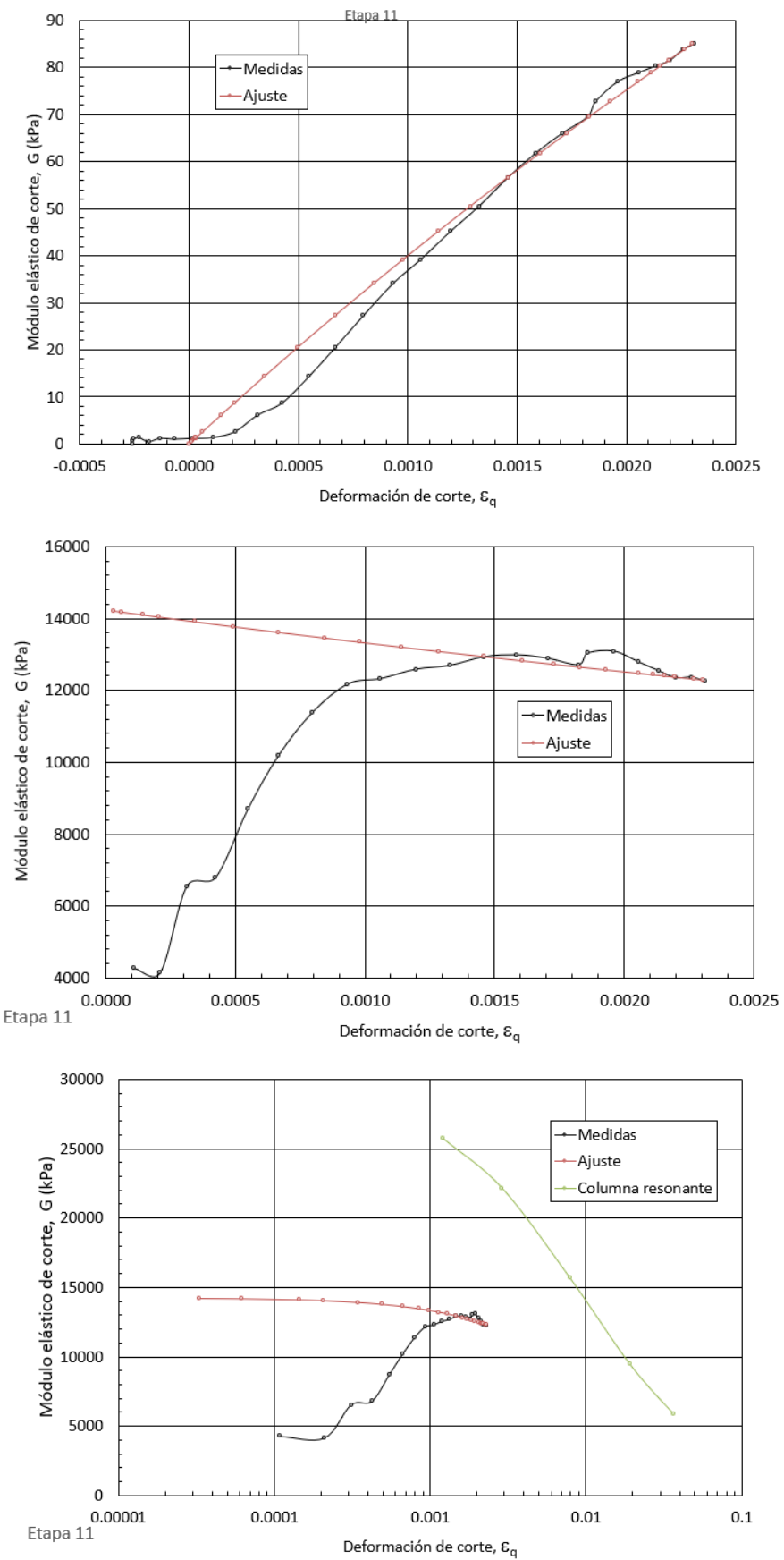


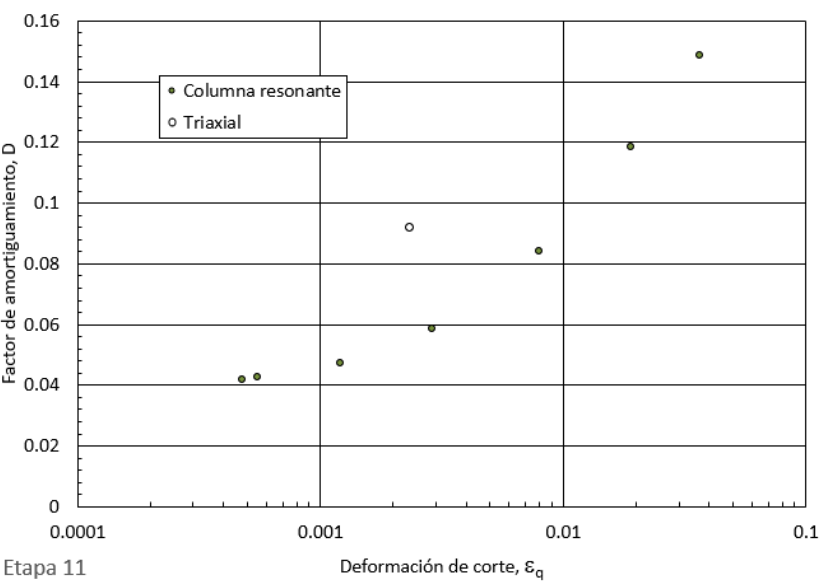




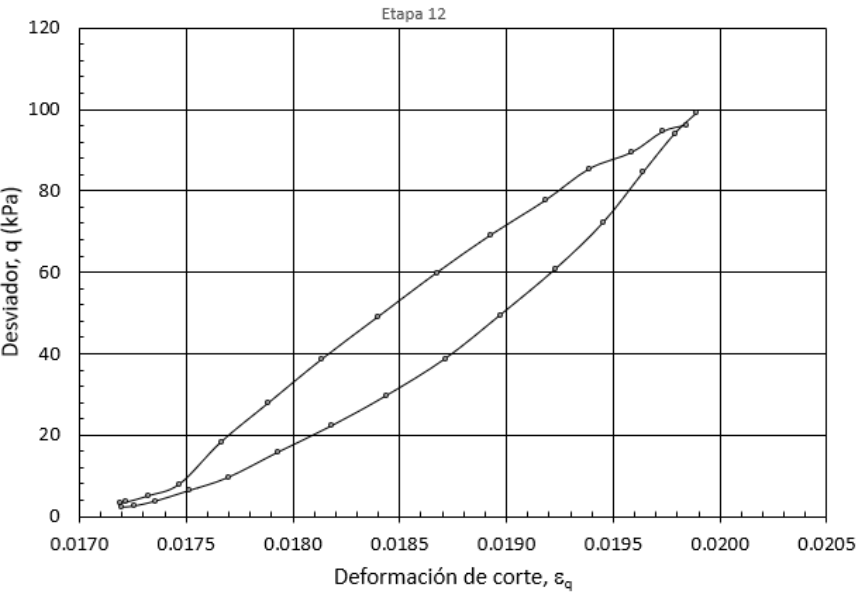
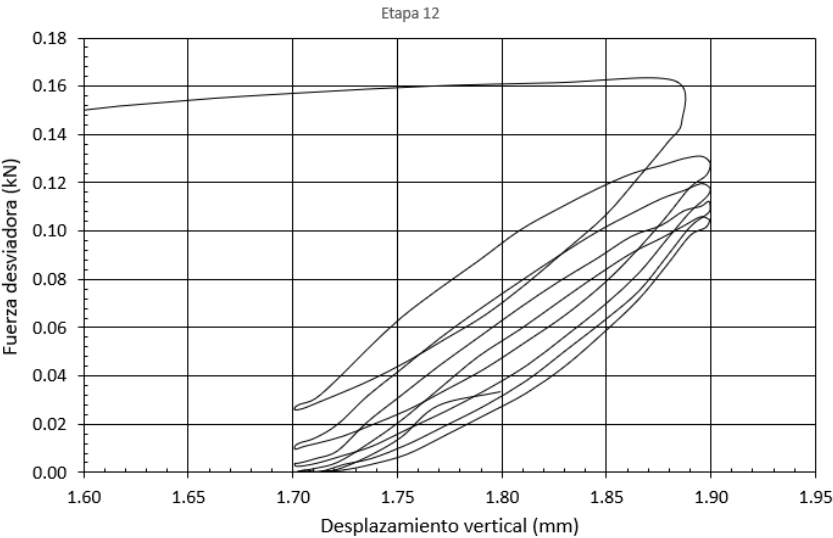
Etapa 11

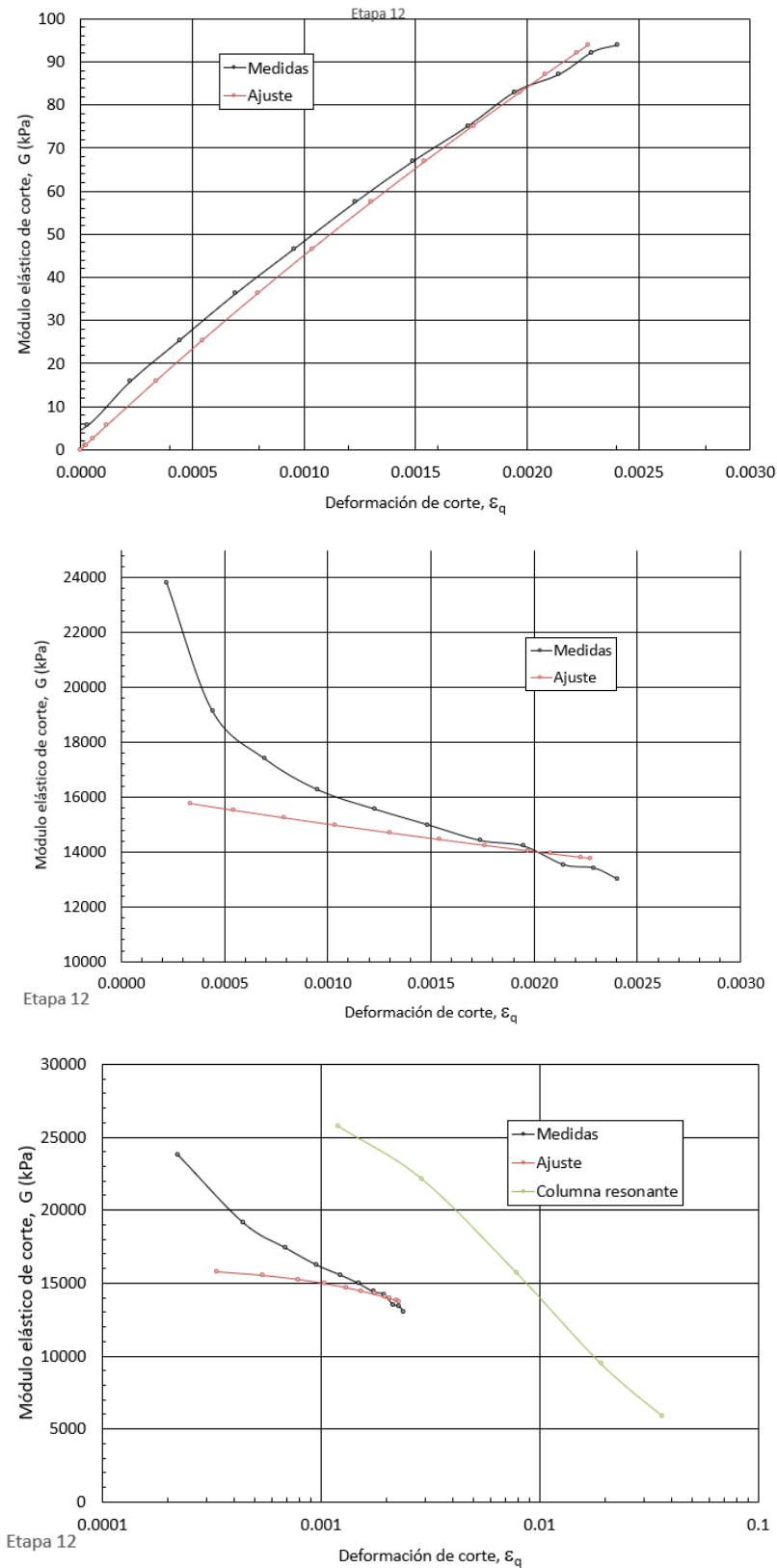


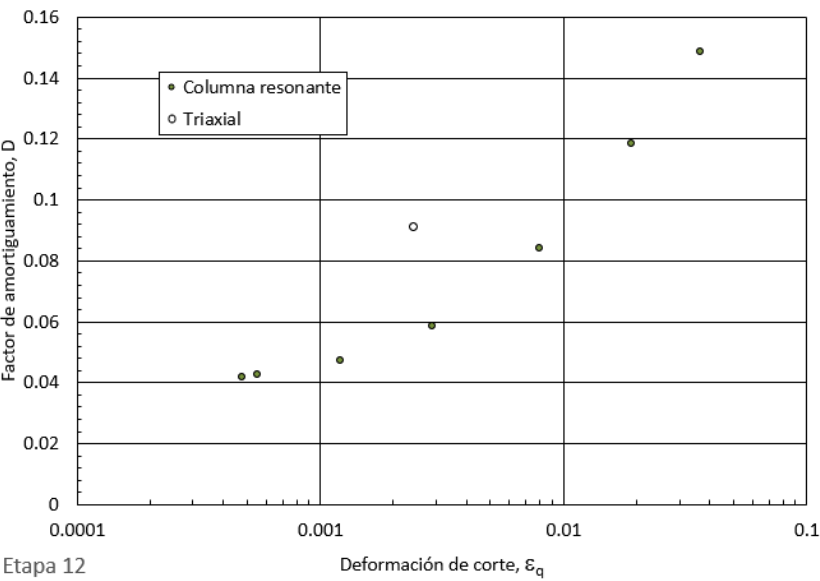




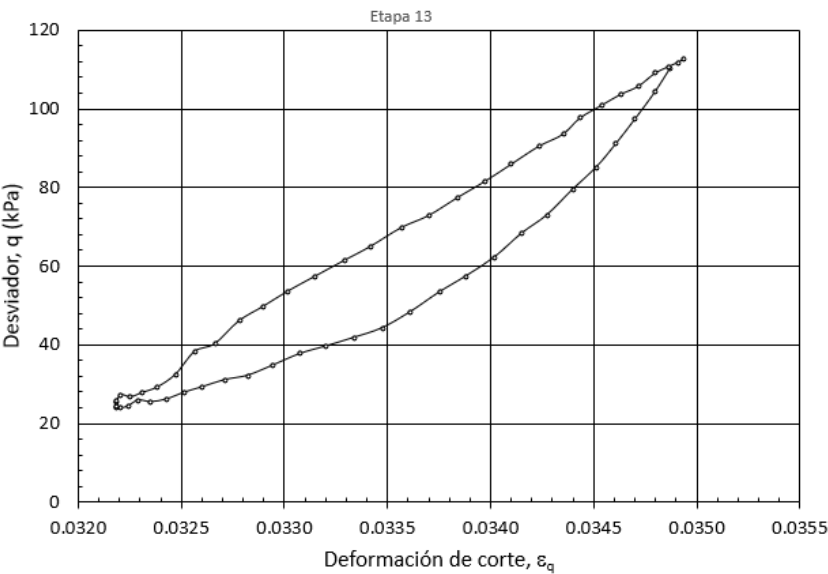
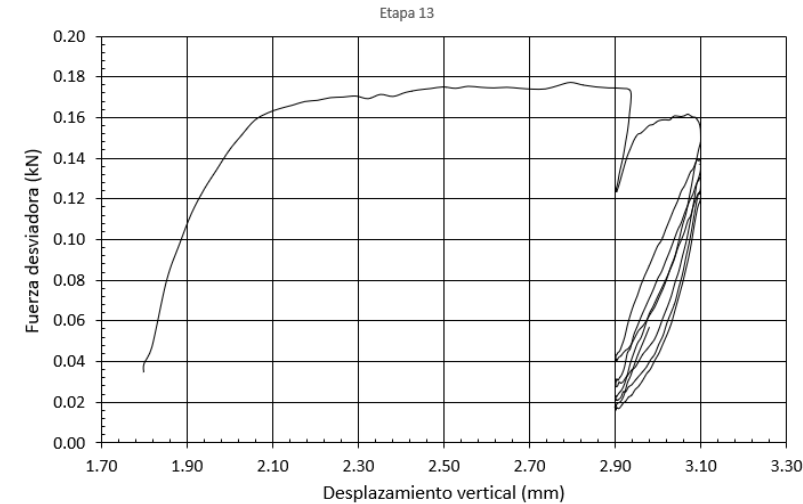
Etapa 12

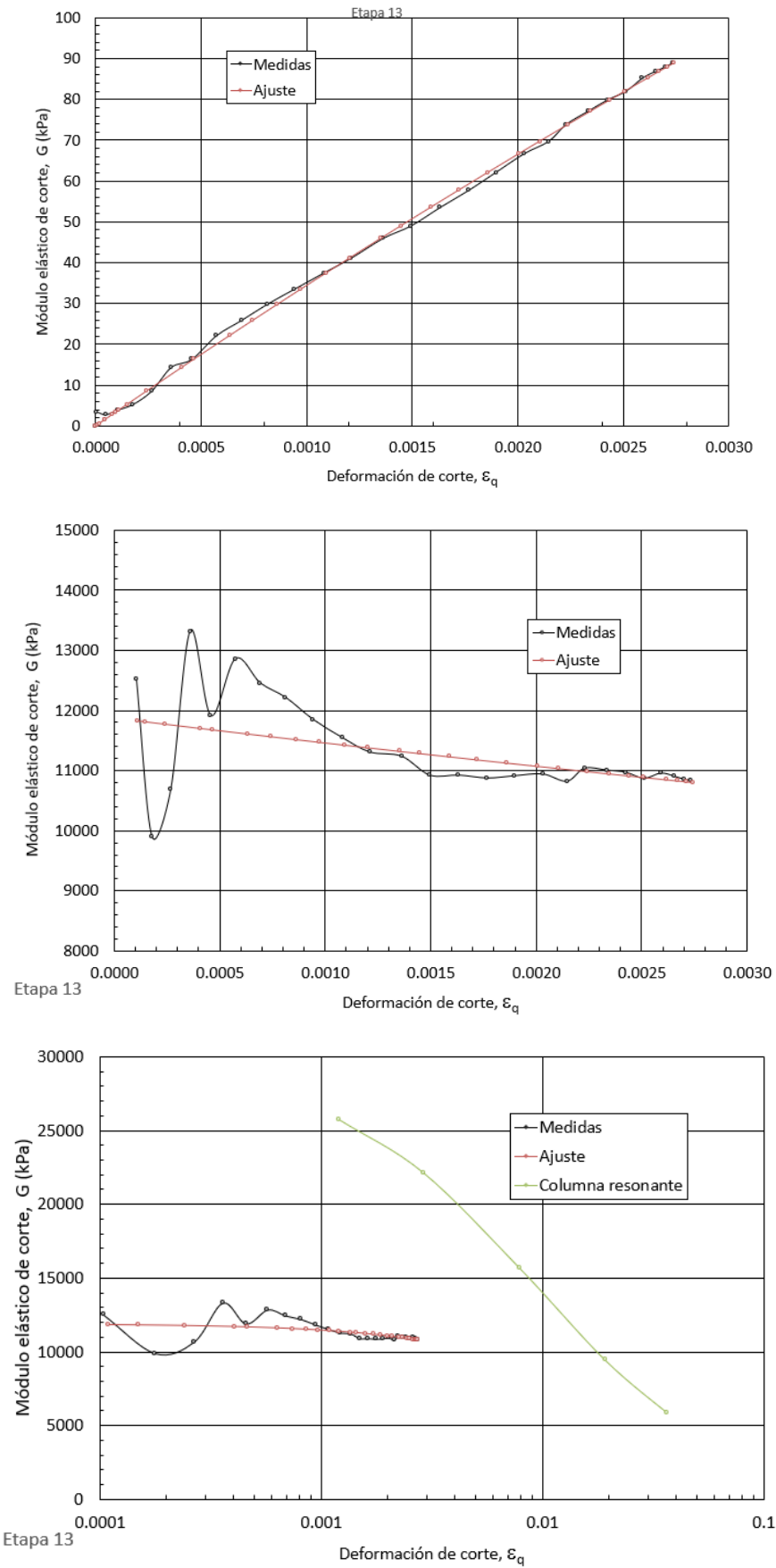


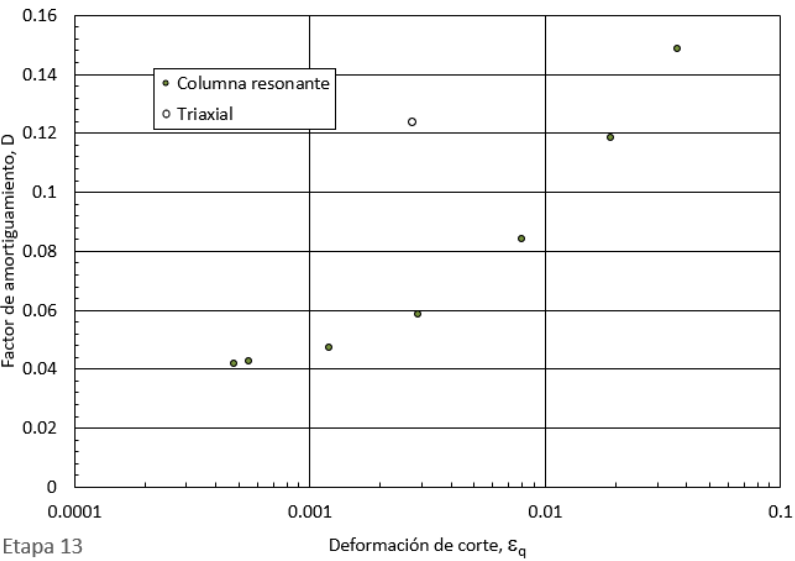




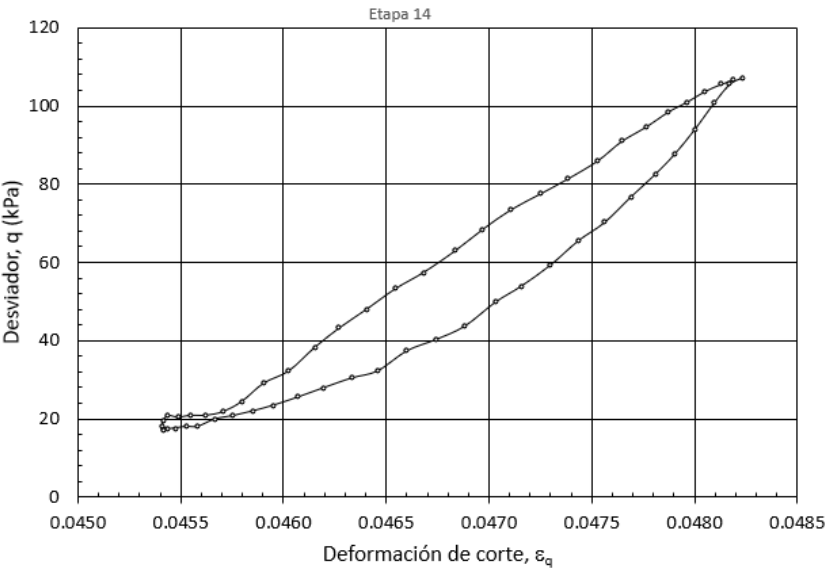
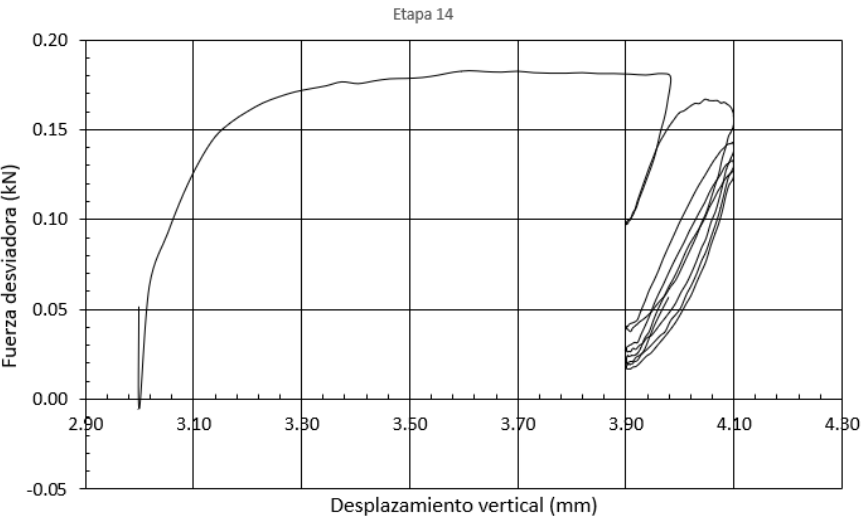
Etapa 13

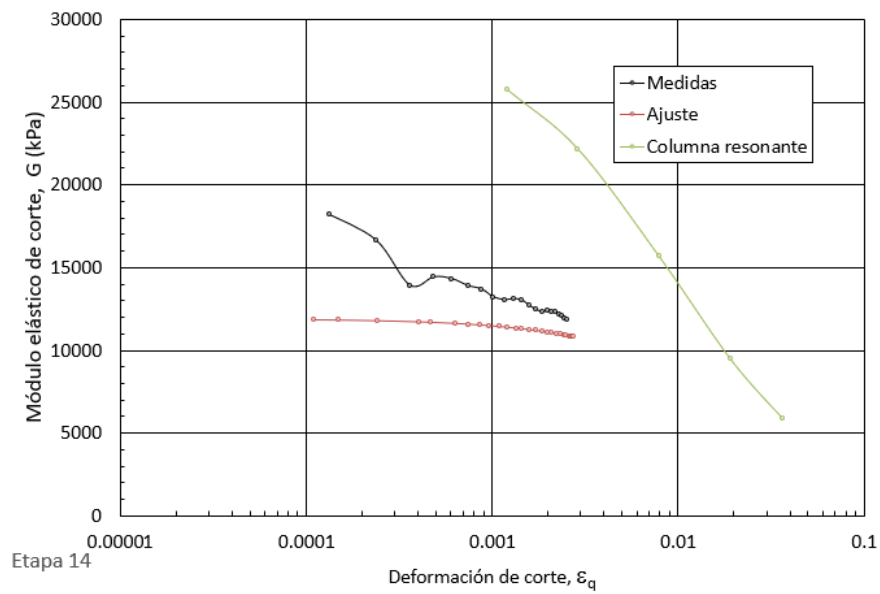
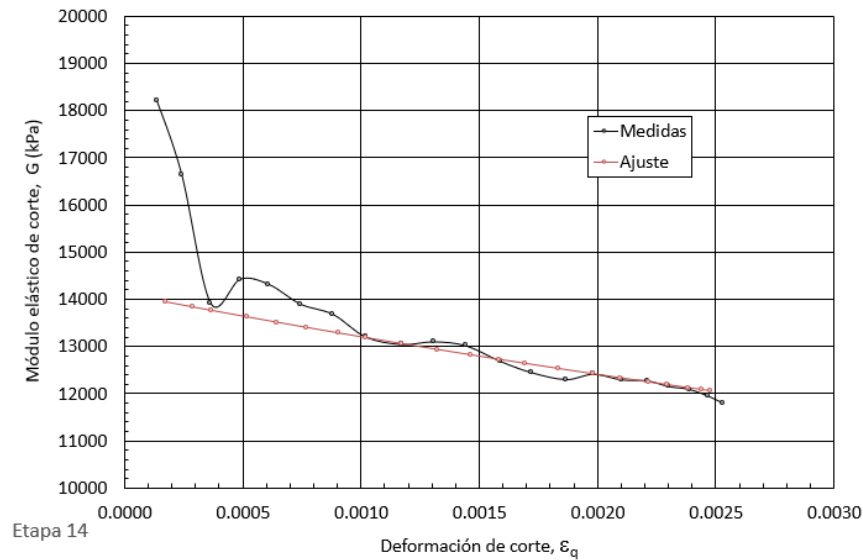
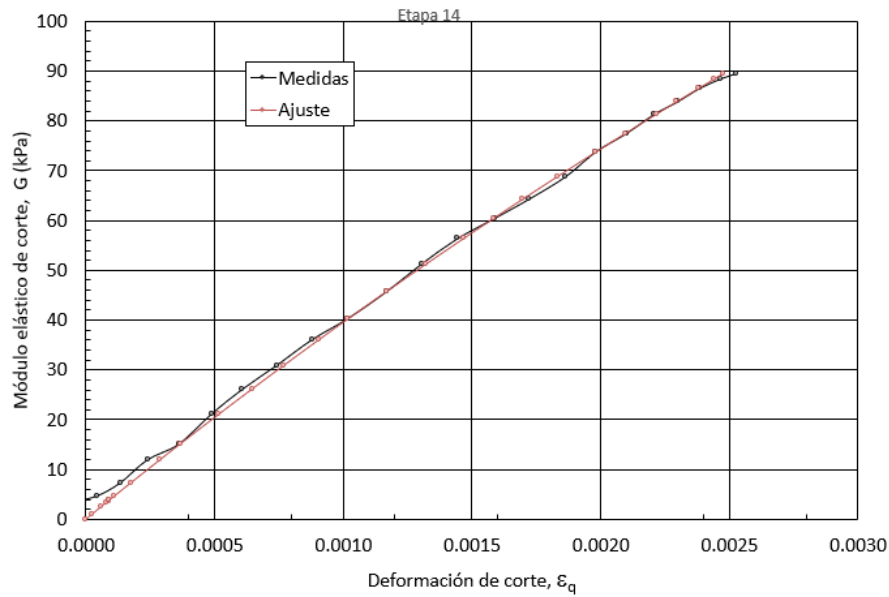


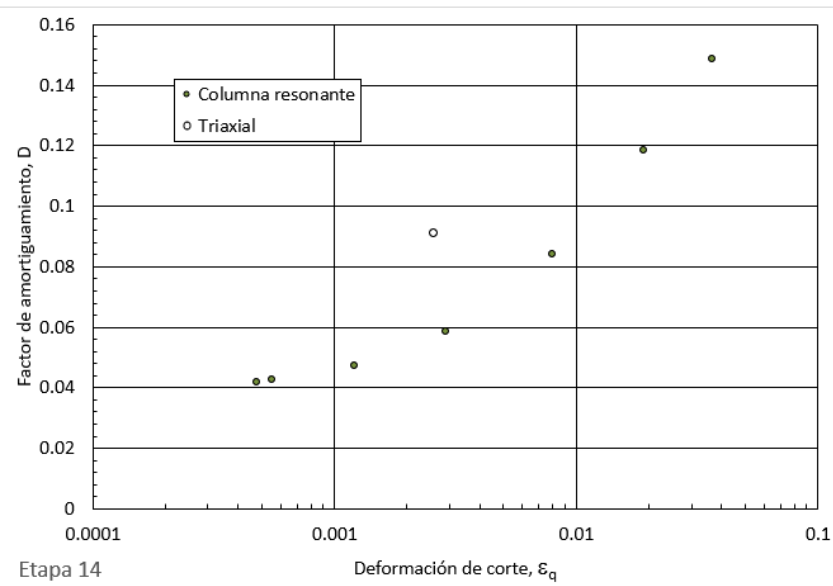




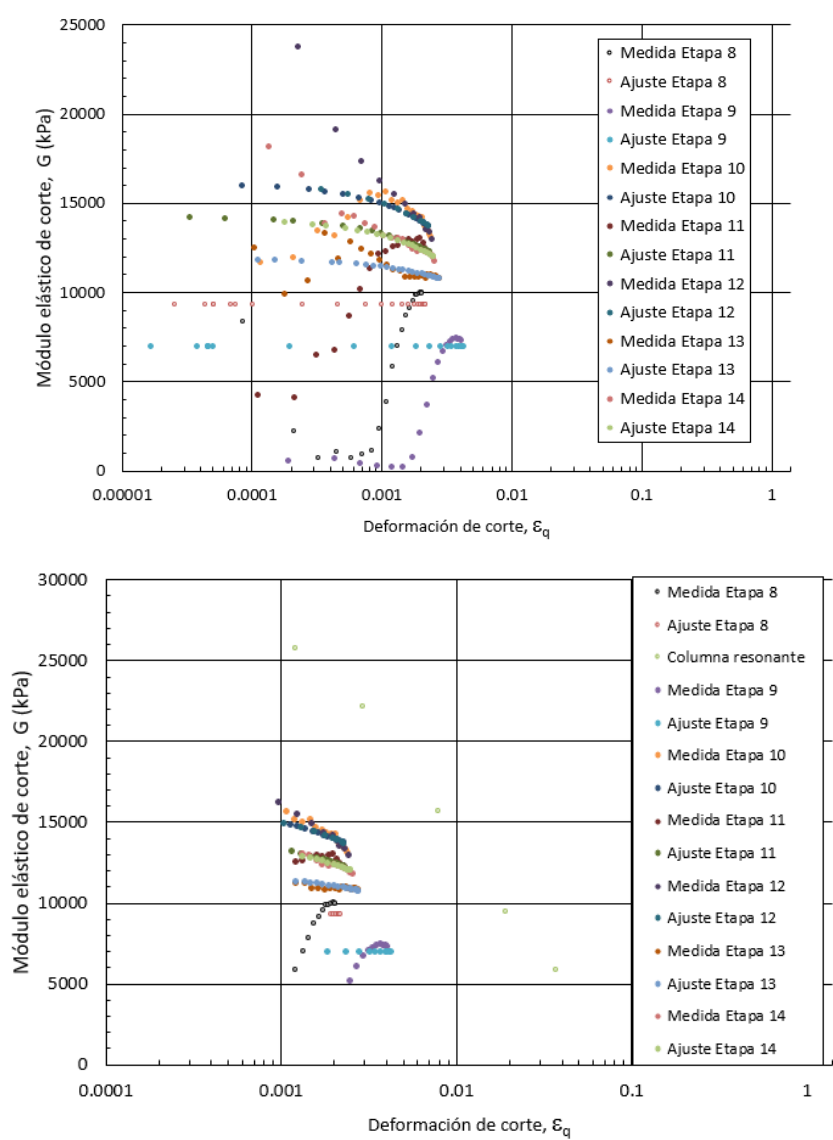
Etapa 14

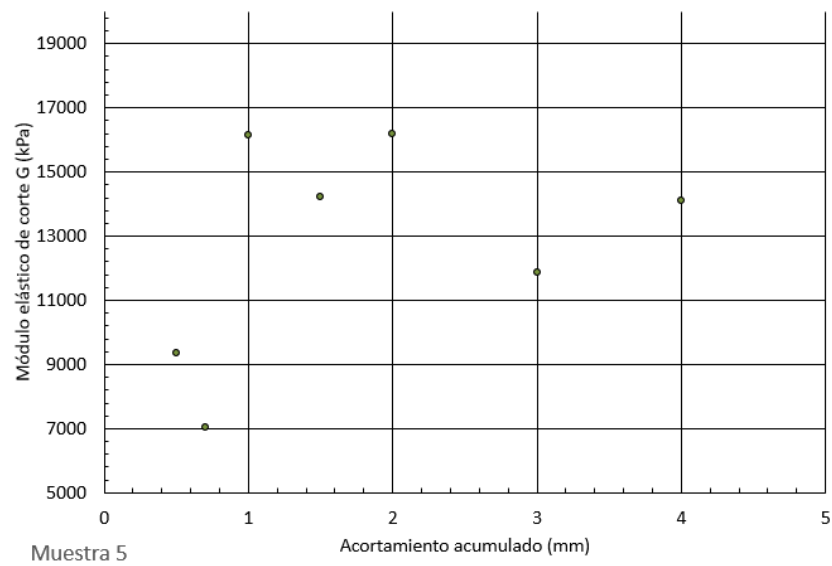
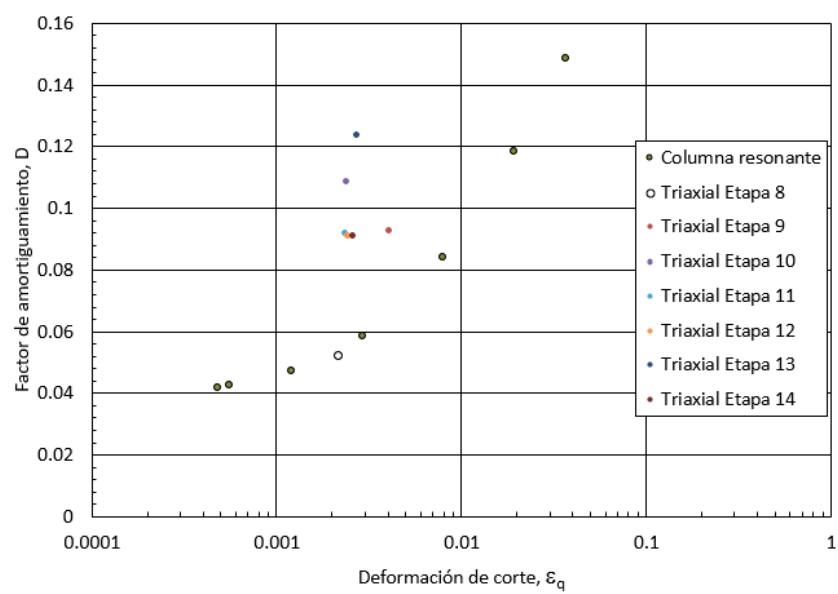




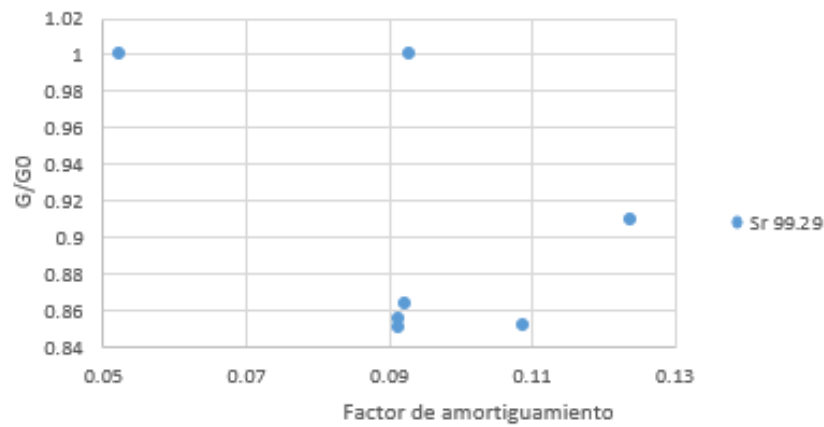


Todas las etapas





Muestra 5



12.6. Anexo todas las muestras

